

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

ANALYSE DE L'AJUSTEMENT MORPHOSÉDIMENTAIRE D'UNE RIVIÈRE DIVAGANTE À DES
TRAVAUX D'EXCAVATION DE SÉDIMENTS : LE CAS DE LA RIVIÈRE DE L'ANSE PLEUREUSE EN
GASPÉSIE

MÉMOIRE DE MAÎTRISE
PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR

PHILIPPE BOURDON

AOÛT 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

Avant-propos

L'excavation de sédiments du lit des rivières constitue une intervention majeure. C'est avant même de connaître les concepts, les théories et les connaissances actuelles dans le domaine que je me suis intéressé au sujet. En 2009, mon employeur de l'époque, le ministère des Transports du Québec, s'apprêtait à réaliser des travaux d'excavation de sédiments dans une rivière divagante dans le but d'atténuer le risque d'inondation.

Je me suis alors posé quatre questions, qui ont conduit à la réalisation de ce mémoire. Tout d'abord, ces travaux d'excavation sont-ils pertinents et l'approche choisie optimale? Ensuite, ces travaux sont-ils réalisés de la manière la moins dommageable possible pour le cours d'eau, d'un point de vue géomorphologique? Également, quels seront les ajustements du cours d'eau? Et enfin, sommes-nous en mesure de les anticiper?

Le présent mémoire porte sur l'ajustement morphosédimentaire d'un tronçon de la rivière de l'Anse Pleureuse excavé en 2009. Il comporte deux années de suivi topométrique, granulométrique et photographique. L'analyse traite des ajustements observés à l'échelle du tronçon et de l'évolution historique de la trajectoire hydrogéomorphologique à l'échelle de la vallée. Les sources sédimentaires, les causes des variations historiques des régimes sédimentaire et hydrologique, de même que l'estimation du régime sédimentaire sont des aspects qui n'ont pu être investigués et constituent les limites de cet exercice.

Remerciements

Je remercie mon directeur, monsieur Thomas Buffin-Bélanger, qui a été le premier à croire à mon potentiel quant à poursuivre des études en cycle supérieur. Thomas m'a offert un encadrement excellent, notamment en orientant mes réflexions pour la réalisation de ce projet. Je tiens également à souligner l'ouverture de Thomas à soutenir cette étude dans le contexte de sa réalisation, lié à ma situation professionnelle qui s'est poursuivie en parallèle de cet exercice. C'est dans le laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale que Thomas m'a accueilli et où j'ai pu bénéficier non seulement des instruments, mais du soutien et de l'expertise d'une équipe dynamique.

Je remercie mes collègues du laboratoire qui ont participé à la collecte de données, dont Maxime Boivin, Pierre Simard, Véronique Parent et Claude-André Cloutier. Je tiens particulièrement à souligner l'implication de Geneviève Allard et de Susan Taylor qui, en plus d'une aide précieuse lors de la collecte de données, ont partagé avec moi de nombreuses réflexions qui m'ont aidé à cheminer. Mes parents, Francine et Marc-André, dont l'appui incontesté a débuté dès le début de ma carrière académique, doivent être grandement remerciés. Je remercie enfin ma famille, Fannie Dubeau et Léa Bourdon, qui ont également pris part à cette aventure académique par leur soutien moral.

La direction régionale du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine du ministère des Transports du Québec fut le point de départ de cette aventure. Je tiens à remercier messieurs Louis Belzile et Serge Rhéaume, biologistes au ministère des Transports du Québec, de même que Victor Bérubé, chef du Service des inventaires et du Plan du ministère des Transports du Québec, pour leur intérêt et appui à ce projet. Enfin, je remercie Anne-Marie Leclerc, collègue au ministère, pour son soutien technique lors des campagnes de terrain.

Table des matières

Avant-propos	ii
Remerciements	iii
Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des équations	xi
Liste des sigles et symboles	xii
Liste des symboles	xii
RÉSUMÉ.....	xiii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE.....	3
1.1 Gestion des rivières : le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse	3
1.1.1 Dynamisme de la rivière de l'Anse Pleureuse.....	3
1.1.2 Processus de planification de travaux en rivière	6
1.1.3 Intégration de la géomorphologie dans les processus de gestion.....	9
1.2 Équilibre morphosédimentaire et dynamique des rivières divagantes	11
1.2.1 Style divagant et classification des environnements fluviaux	11
1.2.2 Dynamique des bancs d'accumulation	14
1.2.3 Transport de sédiments et bilan sédimentaire	16
1.3 Perturbations par excavation et réponses géomorphologiques	19
1.3.1 Type de travaux d'excavation de sédiments.....	19
1.3.2 Impacts morphologiques	21
1.3.3 Temps de réponse et trajectoire morphologique.....	27
1.3.4 Stratégie de planification des travaux	29
1.4 Problématique et objectifs	32
CHAPITRE II SITE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE.....	35
2.1 Caractérisation du site d'étude.....	35
2.1.1 Localisation	35
2.1.2 Géographie physique régionale	38

2.2 Méthodologie.....	44
2.2.1 Dynamique fluviale historique	44
2.2.2 Dynamique fluviale observée durant l'étude	50
CHAPITRE III RÉSULTATS	59
3.1 Trajectoire hydrogéomorphologique.....	59
3.1.1 Hydrologie et hydraulique fluviale.....	59
3.1.2 Dynamique du cours d'eau à l'échelle de la section.....	63
3.1.3 Dynamique du cours d'eau à l'échelle du tronçon	67
3.2 État géomorphologique et travaux d'excavation	70
3.2.1 État géomorphologique pré-extraction	70
3.2.2 Granulométrie des sédiments du lit	73
3.2.3 La nature et l'importance des travaux d'excavation	75
3.3 Ajustements morpho-sédimentaires à la suite des travaux d'excavation.....	77
3.3.1 Secteur en aval du pont	78
3.3.2 Secteur en amont du pont	80
3.3.3 Secteur en amont de la zone de dragage	83
3.3.4 Différence morphologique avant les travaux à deux ans	85
3.3.5 Granulométrie et transport sédimentaire	87
CHAPITRE IV DISCUSSION.....	94
4.1 Dynamique des ajustements morphosédimentaires.....	94
4.1.1 Dynamique des ajustements en amont du pont P-02775	94
4.1.2 Dynamique des ajustements à l'aval du pont.....	96
4.1.3 Dynamique temporelle des ajustements.....	97
4.2 Dragage et équilibre géomorphologique.....	100
4.2.1 Dragage, effets escomptés et effets observés.....	100
4.2.2 Équilibre morphologique historique	103
4.2.3 Estimation du taux de transport sédimentaire historique	106
4.3 La gestion des cours d'eau	107
4.3.1 Recommandations sur le type d'étude	107

4.3.2 Apports de la géomorphologie dans la gestion des cours d'eau	109
CONCLUSION.....	112
BIBLIOGRAPHIE	115

Liste des figures

Figure 1.1 : Vue vers l'aval de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse.	4
Figure 1.2 : Évènements fluviaux de la rivière de l'Anse Pleureuse ayant affecté les infrastructures du ministère des Transports du Québec (source : MTQ, 2012).....	5
Figure 1.3 : Photographie du banc central en amont du pont P-02775 avant les travaux.....	7
Figure 1.4 : Style à méandres(A), divagant (B) et à tresses(C) (source : Google Earth, 2012; Buffin-Bélanger, 2011).	12
Figure 1.5 : Profil en plan d'une rivière divagante : sinuosité dans le chenal principal (haut), développement des bancs par accrétion/érosion (bas) (source : Church, 2009).....	14
Figure 1.6 : Typologie des unités de bancs composés primaires (source : Rice <i>et al.</i> , 2009). 15	
Figure 1.7 : Photographie de la rivière Drôme draguée : large lit à tresses en 1900 (A); lit divagant en 1996 (B) (source : Kondolf, 2002).	22
Figure 1.8 : Schéma sur les processus d'érosion régressive vers l'amont et d'érosion progressive vers l'aval après des travaux d'excavation de sédiments dans le chenal. (source : Kondolf, 1994; Kondolf, 1997).	22
Figure 1.9 : Processus d'érosion progressive et régressive sur la rivière Malnant au 20 ^e siècle, en réponse à des travaux d'excavation de sédiments (source : Marston <i>et al.</i> , 2003).	23
Figure 1.10 : Croquis des impacts morphologiques à long terme des travaux d'extraction de sédiments dans les cours d'eau de style à méandres, divagant, à tresses. (source : Surian et Rinaldi, 2003).	25
Figure 1.11 : Affouillement d'un pilier de pont sur la rivière Arno, incision de 6 m (A) (source : Surian et Rinaldi, 2003); Affouillement sur la rivière Stony Creek (B) (source : Kondolf, 1994); Effondrement d'un pont sur la rivière Tordera (C) (source : Rovira, 2005). .	26
Figure 1.12 : Ajustement de la hauteur de sections transversales des lits des rivières Po (A) et Arno (B) au cours du dernier siècle (source : Surian et Rinaldi, 2003).	27
Figure 2.1 : Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la rivière de l'Anse Pleureuse.	37
Figure 2.2 : Vue vers l'aval de la vallée en auge, aspect divagant de la rivière de l'Anse Pleureuse et localisation du lac et du delta lacustre.	39
Figure 2.3 : Croquis morphosédimentologique de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse (Source : Héty et Gray, 1985).	40
Figure 2.4 : Sources sédimentaires : érosion latérale dans un talus d'éboulis produisant un apport direct de colluvions de versants (A); érosion latérale dans la plaine alluviale produisant un apport direct d'alluvions récentes(B).	41
Figure 2.5 : Évènements pluviométriques de 2002 ayant modifié la charge en sédiments dans la rivière de l'Anse Pleureuse, secteur du « coteyage » (A) (à 22 km de l'embouchure), secteur de rupture de pente (B) (à 12 km de l'embouchure) (Source : Gasse, 2012).	42

Figure 2.6 : Localisation du secteur à d'étude dans le profil longitudinal de la rivière de l'Anse Pleureuse.....	42
Figure 2.7 : Localisation des mesures dans le tronçon à l'étude.	50
Figure 2.8 : Levé topographique du lit et des berges de la rivière de l'Anse Pleureuse avec la station totale robotisée. Station robotisée (A); Levé de la surface du lit avec le prisme (B).	53
Figure 2.9 : Repère d'arpentage sur le pont P-02775.....	54
Figure 3.1 : Relations entre la série temporelle de débit spécifique de la rivière Madeleine avec les séries temporelles des débits spécifiques des rivières Darmouth (A), Sainte-Anne (B), Cascapedia (C) et York (D).	60
Figure 3.2 : Série chronologique des débits maximaux annuels de la rivière de l'Anse Pleureuse, reconstituée à partir des débits maximaux annuels de la rivière Madeleine (1954-1996) et de la rivière York (1997-2012).....	61
Figure 3.3 : Série temporelle de débit de la rivière de l'Anse Pleureuse (2009-2011) reconstituée à partir des données de la station sur la rivière York.	62
Figure 3.4 : Évolution historique du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse dans la section à l'étude, tracés de 1963 et 2004 sur photo aérienne infrarouge de 2004. Position des transects de mesure de largeur. Berge libres et tronçons dynamiques (a) et (c); berges ancrées et tronçons statiques (b) et (d).....	64
Figure 3.5 : Variabilité spatiale des largeurs du cours d'eau au droit de chacun des transects le long du corridor fluvial, pour les années 1963, 1975, 1986, 1992, 2000 et 2004.	65
Figure 3.6 : Variabilité de la largeur du corridor fluvial pour chacune des années relevées..	66
Figure 3.7 : Variabilité historique de la largeur du transect 7 (tronçon a) et localisation d'un pont privé en 1986 : 1963 (A); 1975 (B); 1986 (C); 2004 (D). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et jaune 2004.	67
Figure 3.8 : Positions historiques du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse, section en amont du pont P-02775 : 1963 (A); 1975 (B); 1986 (C); 2004 (D). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et jaune 2004.	68
Figure 3.9 : Positions historiques du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse, section en aval du pont P-02775, photos aériennes de 1963 (A), 1975 (B), 1986 (C) et 2004 (C). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et rouge 2004.....	69
Figure 3.10 : Localisation d'un enrochement en 1963 (A), aujourd'hui abandonné par la rivière (B).....	70
Figure 3.11 : État géomorphologique pré-extraction.	71
Figure 3.12 : Embâcles de bois couvrant une rive droite en amont.	72
Figure 3.13 : Granulométrie (D50) des sédiments le long de la rivière de l'Anse Pleureuse et pente du talweg.	74
Figure 3.14 : Variabilité de la granulométrie (D50) des sédiments du lit avant les travaux d'excavation.....	75

Figure 3.15 : Photographie de la section amont du pont P02775 avant les travaux (A) et après les travaux (B).....	76
Figure 3.16 : Photographie de la section aval du pont P02775 avant les travaux (A) et après les travaux (B).	76
Figure 3.17 : Topographie de la morphologie du lit de la rivière de l'Anse Pleureuse avant et après les travaux d'excavation et différence topographique relevée. Topographie avant les travaux (A); topographie après les travaux (B); Différence topométrique avant-après les travaux (C).....	77
Figure 3.18 : Ajustements morphologiques et différence topométrique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en aval du pont.	79
Figure 3.19 : Ajustements morphologiques et différence topométrique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en amont du pont.	81
Figure 3.20 : Ajustements morphologiques et différence de topométrie de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en amont de la zone de dragage.....	84
Figure 3.21 : Différence topométrique et morphologique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie avant les travaux; puis après 2 ans d'ajustements.	86
Figure 3.22 : Ajustements granulométriques (D50) suivant les travaux de dragage de 2009.	88
Figure 3.23 : Distribution en boîte et moustache de la granulométrie des cailloux par transect dans la zone draguée.	90
Figure 3.24 : Parcours des cailloux traceurs pour les périodes 2009-2010 (A) 2010-2011 (B) et de 2009-2011 (C) dans la rivière de l'Anse Pleureuse.	91
Figure 3.25 : Évènements de mobilité durant la période de suivi.	93
Figure 4.1 : Processus d'érosion régressive et d'activation d'une anabranch. Début de l'érosion régressive immédiatement après les travaux (A); élargissement de l'anabranch après 2 ans d'ajustement (B).	96
Figure 4.2 : Dynamique temporelle des ajustements morphosédimentaires de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation	99
Figure 4.3 : Comparaison de la largeur moyenne annuelle de la rivière au taux de transport sédimentaire potentiel de la rivière de l'Anse Pleureuse (débit spécifique critique de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$).....	104
Figure 4.4 : Apports/retraits sédimentaires historiques extérieurs au flux naturel (excavation, apport torrentiel).	105

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Caractéristiques des photographies aériennes historiques utilisées.....	45
Tableau 2.2 : Caractéristiques des stations des bassins versants des rivières jaugées.	47
Tableau 2.3 : Date des campagnes de terrain.	51
Tableau 2.4 : Distribution des traceurs sur le site à l'étude.	55
Tableau 3.1 : Évènements pluviométriques supérieurs à 59 mm de pluie, mesurés à la station de Murdochville, ayant entraîné des écoulements hyper-concentrés dans les torrents du bassin versant de la rivière de l'Anse Pleureuse (modifié de Caron-Fournier, 2009)	63
Tableau 3.2 : Pourcentage de comblement de la fosse d'excavation selon les années d'ajustements.	87
Tableau 3.3 : Ajustement granulométrique du lit aux travaux d'excavation.	89
Tableau 3.4 : Déplacement moyen des traceurs à partir de leur origine	92

Liste des équations

Équation 2-1 : Relation entre le débit et l'aire d'un bassin versant (source : Benyaha, 2009)	48
Équation 2-2 : Équation de transport de sédiment de Schoklitsch's (1934) (source : Gob <i>et al.</i> , 2005)	57
Équation 2-3 : Puissance spécifique critique (source : Costa 1983, dans Petit <i>et al.</i> , 2005) .	57
Équation 2-4 : Puissance spécifique et débit spécifique critique) (source : Bagnold 1977, dans Petit <i>et al.</i> , 2005).....	58

Liste des sigles et symboles

MDDEFP	Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs
MPO	Ministère des pêches et des océans
MRC	Municipalités régionales de comté
MRNF	Ministère des ressources naturelles et de la faune
MTQ	Ministère des transports du Québec
MRC	Municipalité régionale de comté

Liste des symboles

A	Superficie du bassin versant
D_i	Diamètre des grains mobilisés
D50	Diamètre moyen des grains
g	Accélération gravité
Gs	Taux de transport
Q	Débit
Q_{cr}	Débit spécifique critique
S	Pente
W	Largeur
ω_o	Puissance spécifique critique
ω	Puissance spécifique
ρ	Densité

RÉSUMÉ

Cette étude vise à documenter, par le biais d'un diagnostic hydrogéomorphologique, la réponse morphodynamique d'une rivière divagante soumise à des travaux d'excavation pour augmenter l'espacement hydraulique et supprimer un banc à proximité d'une traverse de cours d'eau. Notre hypothèse est que les travaux affectent l'équilibre morphologique et, par conséquent, la stabilité du cours d'eau par l'activation des processus tels que l'érosion régressive et progressive. Un suivi topométrique et granulométrique de deux ans a permis de quantifier les ajustements géomorphologiques alors que des analyses historiques ont amené à reconnaître le comportement et la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière. Des événements en relation avec des perturbations dans le régime sédimentaire ont pu être identifiés. Avec un comblement de 52% de la portion draguée, il appert que le dragage n'a qu'un effet temporaire puisque le comblement de la fosse débute dès le premier événement morphogène et les formes du lit se rétablissent également selon ce même délai dans la fosse d'excavation. L'impact majeur concerne l'augmentation de l'instabilité du tracé en plan en amont de la zone draguée où l'érosion régressive a provoqué l'enlèvement d'un embâcle de concavité qui protégeait la berge gauche. Il en résulte l'activation de la migration latérale de cette berge qui pourrait devenir problématique pour la sécurité de la route. L'analyse historique a mis en lumière le dynamisme de la rivière, qui se traduit par des pulsations épisodiques de la largeur du chenal dont les variations sont de l'ordre de 10 mètres sur une moyenne de largeur de 25 mètres. Les résultats suggèrent que les travaux de dragage n'ont atteint leurs objectifs que pour une période très courte et que d'autres travaux seront nécessaires. Plus important, les résultats montrent que l'absence de considérations géomorphologiques dans le processus de gestion des cours d'eau amène à réaliser des travaux dont les effets peuvent être non désirés qui rendent caduque l'intervention même.

Mots clés : Dragage, morphodynamique, réponse géomorphologique, transport sédimentaire, trajectoire géomorphologique.

INTRODUCTION

Les travaux d'excavation de sédiments dans les rivières constituent l'une des plus importantes formes d'intervention anthropique modifiant la morphologie du chenal (Wishart *et al.*, 2008). Bien que les travaux intensifs soient de plus en plus rares sur la scène internationale (Kondolf, 1997; Rovira, 2005; Gob *et al.*, 2005), des travaux d'entretien de cours d'eau et de prévention des risques d'inondation sont encore dans la liste des options utilisées par les gestionnaires de rivières. Tel a été le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse dans laquelle, à l'automne 2009, des travaux d'excavation de près 6 248 m³ (450 camions) ont été conduits dans une portion de la rivière à proximité d'un pont de la route 198. L'étude dont traite le présent mémoire porte sur l'ajustement de la rivière de l'Anse Pleureuse suite à ces travaux d'excavation et s'élargit ensuite avec une réflexion sur la stratégie de gestion et de planification de travaux en rivière au Québec.

La littérature traitant des impacts de travaux de dragage en rivière est abondante (Kondolf, 1994, 1997, 2002; Surian, 2003; Rempel, 2004; Rovira, 2005), toutefois elle s'intéresse davantage à des cas de dragage intensif historiques à une échelle régionale. En effet, on ne retrouve que peu d'études réalisées à haute résolution sur un cas ponctuel de perturbation par excavation. Citons par exemple celles de Gob *et al.* (2005), Karle et Kenneth (2007) et Rempel (2004). Soulignons également qu'au Québec, on ne dispose d'aucun cadre d'analyse hydrogéomorphologique permettant de considérer la trajectoire des cours d'eau et d'éclairer l'élaboration de stratégies de gestion des cours d'eau. Le but de l'étude présentée ici est de mieux connaître le contexte géomorphologique ainsi que le contexte de gestion dans lesquels se sont insérés les travaux de dragage dans la rivière de l'Anse Pleureuse et, également, d'acquérir des connaissances sur la dynamique des rivières divagantes en vue de

l'élaboration d'un cadre d'analyse essentiel à l'étude de problématiques similaires. Pour atteindre cet objectif général, trois objectifs spécifiques sont poursuivis par la présente étude : (1) analyser le comportement historique de la rivière; (2) quantifier les interventions d'excavation et les positionner dans le contexte de la dynamique fluviale actuelle du tronçon; (3) documenter les processus d'ajustement de la morphologie du chenal.

Diverses approches méthodologiques ont été déployées. Des relevés terrain ont été réalisés avant et après les travaux, puis sur la base d'un suivi annuel durant deux ans. Des modèles numériques d'élévation ont été générés afin d'analyser les différences de volumes topographiques et d'interpréter les changements morphologiques. Une analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique antérieure a également été réalisée à partir de documents et données historiques (séries hydrométriques, photographies aériennes, etc.). Bien que les données de volumes de sédiments déplacés aient permis de déterminer un seuil hydraulique de mobilisation, l'évaluation du taux de transport, nécessaire à l'élaboration du bilan sédimentaire, dépasse les limites de cette étude et devra être investiguée dans une étude ultérieure. Ainsi, ce sont les apports et retraits de sédiments modifiant le régime sédimentaire qui ont été davantage ciblés que le taux annuel de transport afin de comprendre la dynamique historique.

Le manuscrit est divisé en quatre chapitres, traitant successivement du contexte et de la problématique, du site d'étude et de la méthodologie, des résultats obtenus et enfin de la discussion. Avec le souci de livrer non seulement des résultats de recherche, mais également des observations et des données qualitatives, de nombreuses figures et photographies accompagnent le texte.

CHAPITRE I

CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce premier chapitre s'intéresse aux contextes théorique et appliqué de l'étude. L'approche de la gestion des cours d'eau au Québec est illustrée par le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse. Cette mise en contexte débouche ensuite sur une revue de littérature traitant de l'équilibre morpho-sédimentaire des cours d'eau et des perturbations et réponses géomorphologiques des cours d'eau aux perturbations par excavation. Enfin, ces éléments soutiennent la formulation de la problématique de recherche ainsi que les objectifs de l'étude.

1.1 Gestion des rivières : le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse

Cette première section porte sur la gestion de la rivière de l'Anse Pleureuse et, de manière plus large, sur la prise en compte de considérations géomorphologiques dans les processus de planification de travaux d'entretien des cours d'eau. Le contexte de la rivière de l'Anse Pleureuse est d'abord présenté, suivi d'une description du processus de planification des travaux. Enfin, le niveau d'intégration des considérations géomorphologiques dans la gestion des rivières au Québec est abordé.

1.1.1 Dynamisme de la rivière de l'Anse Pleureuse

S'écoulant au cœur du plateau gaspésien, la rivière de l'Anse Pleureuse (figure 1.1), dont la charge en sédiment est élevée, présente un comportement prompt et impétueux. Ce comportement se distingue par une dynamique de changements morphologiques rapides. Ce dynamisme de la rivière a été relevé par le ministère des Transports du Québec (MTQ),

qui a la charge d'assurer le maintien de la route 198, seul lien routier entre le nord de la Gaspésie et Murdochville. En effet, puisque la route partage avec la rivière le fond de vallée et la traverse à deux reprises, un entretien constant des infrastructures routières doit être assuré en réponse aux soubresauts de la rivière susceptibles d'affecter ces infrastructures.



Figure 1.1 : Vue vers l'aval de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse.

Pour illustration, entre 1980 et 2002, le MTQ a dénombré trois événements torrentiels ayant affecté les ponceaux et la route. Ces événements sont survenus en 1980, en 1991 et en 2002 (Caron-Fournier, 2009). L'événement de 2002 a particulièrement affecté le secteur appelé « *le coteyage* » (figure 1.2.A), lieu où la route 198 gravit le versant. Lors de cet événement, le fossé et une partie de la route le long du « coteyage » ont été emportés par les écoulements torrentiels, de même qu'un tronçon plus en aval, qui a subi une rupture au droit d'une traverse (figure 1.2.B) (*verbatim*, Gasse, 2012). Durant cette même année, le MTQ a également effectué des travaux de dragage au droit du pont P-02775 en réponse à une forte sédimentation (figure 1.2.C).

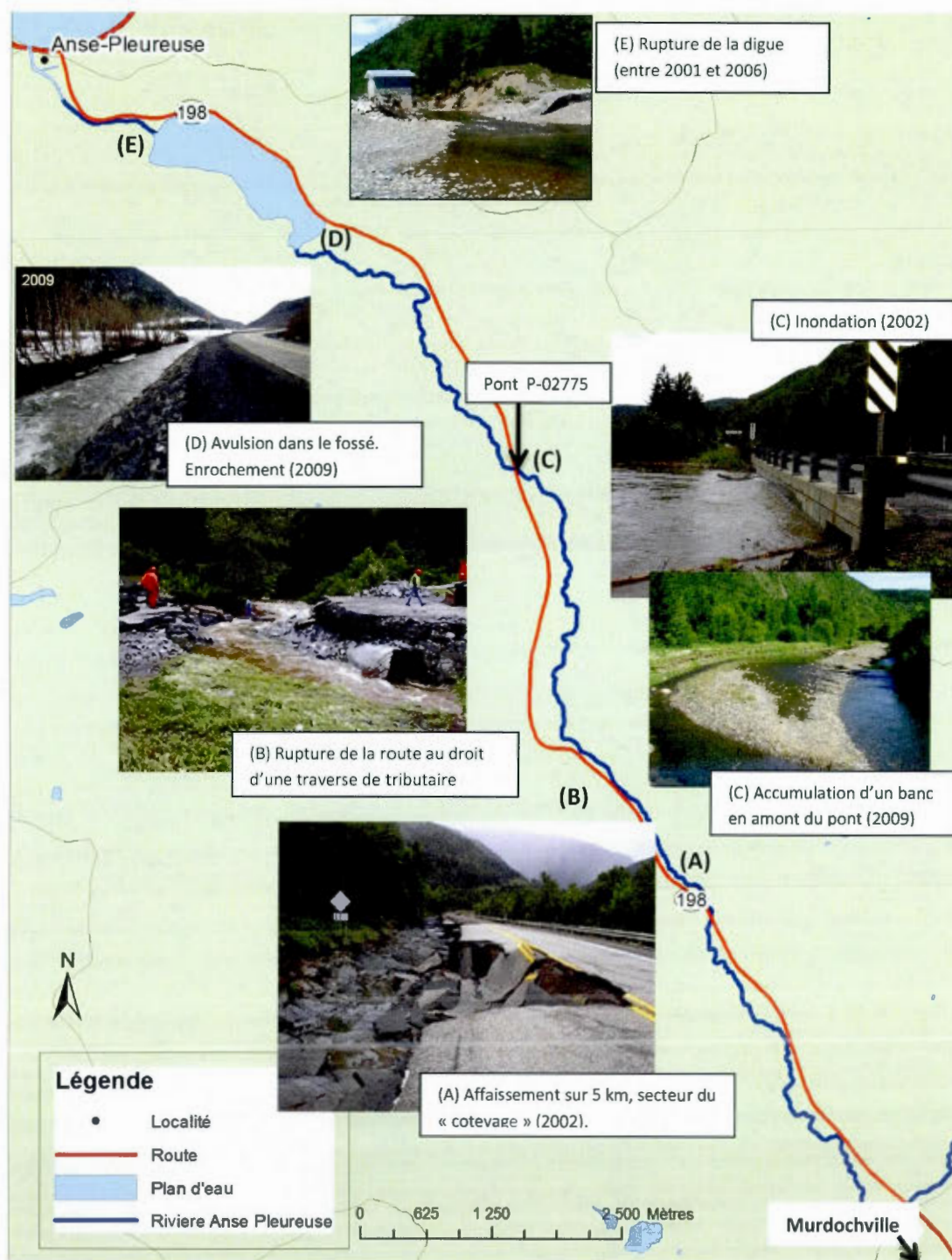


Figure 1.2 : Évènements fluviaux de la rivière de l'Anse Pleureuse ayant affecté les infrastructures du ministère des Transports du Québec (source : MTQ, 2012).

En 2002 également, l'évènement fluvial a détruit un pont privé en amont du pont P-02775 (*verbatim*, Côté, 2010) alors que la digue à l'exutoire du lac a été emportée entre les années 2001 et 2006 (Bourdon, 2008) (figure 1.2.A). Un peu en amont du lac de l'Anse Pleureuse, l'accrétion du lit a provoqué une avulsion et la migration du chenal vers le fossé de la route il y a une dizaine d'années (Genivar, 2009). L'aménagement d'un enrochement a dû être réalisé pour protéger la route à l'automne 2009 (figure 1.2.B) (Rhéaume, 2009). Cette même année, le ministère procédait au dragage de sédiments et à la mise en place d'un enrochement au droit du pont P-02775, en réaction à une forte sédimentation sous le pont. Tous ces évènements soulignent le caractère dynamique de la rivière en regard de quelques propriétaires riverains et des infrastructures du MTQ.

1.1.2 Processus de planification de travaux en rivière

Au Québec, selon les articles 104, 105 et 106 de la Loi sur les compétences municipales (LCM), la gestion des cours d'eau, notamment en regard du libre écoulement des eaux, est une responsabilité municipale depuis 2006 (Gouvernement du Québec, 2006). Cette loi confère aux municipalités régionales de comté (MRC) le devoir d'intervenir en cas d'obstruction à l'écoulement (article 105), la possibilité d'adopter des règlements (article 104) et la possibilité d'exécuter des travaux (article 106). La manière dont les MRC exercent cette responsabilité leur revient. Dans le cas de travaux dans le lit et les berges des cours d'eau, des autorisations doivent être demandées au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) selon la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE).

À la direction territoriale du Bas-Saint-Laurent–Gaspésie–Îles-de-la-Madeleine du MTQ, des inspections régulières sont effectuées aux traverses des cours d'eau dans une optique de gestion des risques fluviaux au droit de ces traverses. Des inspecteurs des structures ont proposé en 2009 d'augmenter l'espacement vertical de l'écoulement en excavant la rivière de l'Anse Pleureuse sous le pont P-02775 (*verbatim*, Rhéaume, 2012). Ces recommandations ont été le point de départ du processus de planification des travaux et ont été émises à la

lumière des recommandations de reconstruction d'un nouveau pont en raison d'un espacement insuffisant sous celui-ci; constat mentionné dans l'étude hydraulique de Poirier et Niquet (1992). Ces recommandations ont été formulées dans le contexte où la reconstruction n'était pas planifiée à court terme et qu'un banc central s'était accumulé depuis le dernier dragage de 2002. Ce banc soulevant, avec le risque d'inondation et d'embâcles de bois, un enjeu de sécurité civile (*verbatim*, (Rhéaume, 2012) (figure 1.3).



Figure 1.3 : Photographie du banc central en amont du pont P-02775 avant les travaux.

Dès lors, le responsable des demandes d'autorisations environnementales du MTQ a débuté des démarches d'analyse du contexte physique et biologique du site à l'étude pour être disposé à faire une demande d'autorisation environnementale. Une caractérisation de l'habitat du poisson a ainsi été réalisée (Tecsult, 2009) et un avis géomorphologique a été rédigé par des employés du ministère (Bourdon, 2009). Cet avis a été produit dans l'optique d'envisager l'impact géomorphologique des travaux et non pour évaluer la pertinence et le type de travaux à réaliser. Une rencontre de travail avec des représentants de divers ministères, ministère fédéral de Pêches et Océans Canada, ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) et MDDEP, a été conduite en août 2009 afin de présenter la problématique et de cerner des pistes de solution, des alternatives et des mesures d'atténuation (Bourdon, 2009). Une demande d'autorisation environnementale a été déposée auprès du MDDEP et un certificat d'autorisation environnementale a été délivré par ce ministère à la suite de cette démarche (Dionne, 2009).

Quelques aspects géomorphologiques ont été analysés durant le processus de planification. Par exemple, l'étude hydraulique (Poirier et Niquet, 1992) mentionne une forte sédimentation sous le pont P-02775 ainsi que la présence de débris ligneux. Par ailleurs, il a été relevé qu'aucune étude portant sur le comportement géomorphologique du cours d'eau n'a été réalisée en vue d'aider à la prise de décision sur le choix de la solution, pourtant en réponse à une trajectoire fluviale. Alors que le type d'intervention avait été décidé, quelques considérations géomorphologiques ont été évoquées lors de la rencontre entre les différents ministères (Bourdon, 2009). Ces éléments concernent notamment la dynamique d'avulsion dans le delta lacustre en aval du site à l'étude et la dynamique d'accumulation d'un banc central en amont du pont. De plus, des impacts des travaux de dragage ont été estimés qualitativement dans l'avis géomorphologique (Bourdon, 2009).

Selon le règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de la LQE (Gouvernement du Québec, 1981), les travaux en rivières de moins de 300 m linéaires ou de moins de 5 000 m² exigent uniquement une autorisation environnementale, alors qu'une étude d'impact sur l'environnement est exigée pour des travaux supérieurs à ces chiffres. Dans ce contexte légal, seule une autorisation environnementale était requise dans le cadre des travaux visés puisque ceux-ci concernaient une longueur de 290 m par 17 m de large, pour une surface totale de 4 930 m².

Le certificat d'autorisation environnementale (Dionne, 2009) a permis, tel que demandé, l'excavation sur 1,5 m de profondeur de sédiments, sur 17 m de large par 290 m de long, avec un raccordement progressif à l'amont et à l'aval. La construction d'un enrochement en rive droite amont du pont, d'une longueur de 50 m par 3 m de hauteur, était aussi visée par cette autorisation. Enfin, l'autorisation prévoyait le dépôt en rive droite amont d'une partie des sédiments dragués, de même qu'en rive gauche aval du pont. À partir des données du devis des travaux, les volumes des sédiments excavés ont été estimés à 6 885 m³.

(1,5 m*17 m*270 m) pour la zone de dragage intensive et à 255 m³ (0,75 m*17 m*20 m) pour les zones de raccordements progressifs amont et aval. Le total estimé est de 7 140 m³.

1.1.3 Intégration de la géomorphologie dans les processus de gestion

Le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse souligne la timidité avec laquelle les considérations géomorphologiques sont intégrées dans le processus de gestion des cours d'eau au Québec. Cette intégration se fait ailleurs dans le monde de manière lente, mais évolutive depuis plusieurs années par un rapprochement entre la géomorphologie fluviale et le génie civil. Spink *et al.* (2009) soulignent que la gestion des rivières en Australie était dominée par le génie de 1952 à 1990. À cette époque, le génie préconisait l'artificialisation et les travaux de machinerie lourde, tels que l'enrochement et l'excavation, afin de contrôler les rivières (Gilvear, 1999; Spink *et al.*, 2009). Hooke (1999) estime que, de manière générale, une contribution entre les deux disciplines est davantage effective depuis les années 1990 pour la gestion des rivières. D'ailleurs, Bravard *et al.* (1999) observent que l'essor de l'ingénierie géomorphologique s'observe à partir de 1980 en France. Pour Gilvear (1999) l'intégration de la discipline à des projets d'ingénierie appliquée aux États-Unis se reconnaît notamment par la rédaction d'un guide par la U.S. Army Corps of Engineers en 1997 intitulé « *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management* ». Ce développement est en lien avec l'évolution de la discipline qui s'intéresse à produire des résultats applicables dans la pratique et qui utilise également des approches technologiques permettant de quantifier les processus (Gilvear, 1999). Enfin, la prise en compte des concepts générés par la géomorphologie constitue la première étape de l'intégration des considérations géomorphologiques dans les politiques de gestion des cours d'eau (Hooke, 1999).

Bravard *et al.* (1999) mentionnent que l'élément déclencheur de cette collaboration des deux disciplines est l'échec de l'ingénierie seule à assurer une prévention des risques d'inondation. Notons aussi que l'approche du génie a été d'étudier les tronçons séparément et de proposer des solutions à la pièce ne tenant pas compte de la perspective du bassin versant dans le contexte local (Bravard, 1999) et dans un contexte temporel (James, 1999).

Dans bien des cas, les travaux en rivière s'adressent aux symptômes, beaucoup plus qu'aux causes sous-jacentes aux changements (Spink, 2009). Pour James (1999), cette approche s'explique par le fait que les ingénieurs travaillent dans un environnement pragmatique, avec des organisations gouvernementales, des consultants et des entrepreneurs. Ils sont, de fait, contraints de mettre l'accent sur des solutions pratiques et tentent de résoudre les symptômes plutôt que de s'attacher aux processus les conditionnent (James, 1999).

Ainsi, depuis l'époque où la gestion des rivières était uniquement du domaine du génie, plusieurs sous-disciplines se sont développées. Toutefois, il convient de distinguer ces diverses approches. Par exemple, le « *soft engineering* », qui consiste à concevoir des structures plus douces telles que la protection des berges par le génie végétal, a été apprécié par les environnementalistes. Cette technique ne constitue pourtant pas une approche géomorphologique puisqu'elle n'intègre pas une compréhension holistique à l'échelle du bassin versant, ni une évaluation de l'historique de la dynamique fluviale (Bravard *et al.*, 1999). De leur côté, les géomorphologues ont la capacité d'intégrer l'interdépendance des systèmes géomorphologiques à l'échelle du bassin versant et de caractériser la variabilité des processus dans le temps (Hooke, 1999). De plus en plus ces concepts sont appliqués dans le domaine de l'ingénierie. Bravard *et al.* (1999) reconnaissent même l'émergence d'une branche de l'ingénierie spécialisée en géomorphologie : l'ingénierie géomorphologique.

Gilvear (1999) reconnaît quatre champs d'application de la géomorphologie fluviale au domaine appliqué, soit (1) la reconnaissance et la promotion de la connectivité latérale, verticale et amont-aval du système fluvial; (2) la compréhension de la trajectoire historique à diverses échelles et la reconnaissance de l'héritage quaternaire; (3) la perception de la sensibilité du système géomorphologique à des changements et à des perturbations; (4) l'intégration du relief et des processus dans le contrôle et la définition des biotopes en faisant la promotion d'approches écologiquement acceptables. Selon Palmers *et al.* (2003), la restauration d'écosystèmes fluviaux a de plus grandes chances d'être réussie par des

équipes interdisciplinaires d'ingénieurs, d'écologistes et de géomorphologues que par un foyer unique d'ingénieurs. Des guides de bonnes pratiques, rédigés par des équipes multidisciplinaires, témoignent d'ailleurs de cette tendance (NOAA, 2004).

Dans le cadre des travaux réalisés dans la rivière de l'Anse Pleureuse, nous nous intéresserons maintenant à un recensement de connaissances plus spécifiques aux trois premiers champs d'application de la géomorphologie fluviale identifiés par Gilvear (1999), soit la notion d'équilibre morphosédimentaire, la dynamique des rivières divagantes et la réponse hydromorphologique des cours d'eau suite à des travaux d'excavation.

1.2 Équilibre morphosédimentaire et dynamique des rivières divagantes

Kondolf *et al.* (2001) mentionnent que les stratégies de gestion mettant uniquement l'accent sur les formes des rivières, sans examiner et considérer les processus qui modulent ces formes, sont appelées à être inefficaces. Cette section traite des connaissances actuelles sur la dynamique des rivières divagantes et de la compréhension des processus morphosédimentaires conditionnant cette dynamique.

1.2.1 Style divagant et classification des environnements fluviaux

À l'échelle des tronçons, les styles fluviaux constituent une classification géomorphologique de l'arrangement spatial des formes de rivières. On distingue d'abord deux grandes familles de chenaux selon les contraintes imposées à leur mobilité. D'une part, on recense les chenaux dont le lit est en partie contrôlé par la roche en place, on parle de rivières semi-alluviales. D'autre part, les chenaux dont le lit évolue essentiellement dans les alluvions sont définis de rivières alluviales. Le tronçon à l'étude de la rivière de l'Anse Pleureuse appartient à la deuxième catégorie, soit les rivières alluviales.

Pour les environnements alluviaux, les styles géomorphologiques rectilignes, à méandres et à tresses sont bien admis au sein de la communauté scientifique depuis leur définition en 1957 (Leopold et Wolman, 1957) (figure 1.4). Cette classification a d'ailleurs été amplement

revisitée pour en détailler les limites de classes (Kondolf, 2003). Le style divagant a été défini lui par Neil en 1973 dans Desloges et Church (1989) et a été approfondi par Church (1983), Desloges et Church (1989) et Burge (2006). Ce style présente une transition entre les styles à tresses et à méandres (Church, 1983).



Figure 1.4 : Style à méandres(A), divagant (B) et à tresses(C) (source : Google Earth, 2012; Buffin-Bélanger, 2011).

Le style divagant demeure aujourd'hui quelque peu controversé. En effet, selon la définition de Leopold et Wolman (1957), le style à tresses inclut le style divagant puisque la notion de tressage est perçue de manière élargie même lorsqu'il n'y a qu'un banc central. La rivière dans le cadre de l'étude de Leopold et Wolman (1957) présentait d'ailleurs un aspect plutôt divagant. Enfin, précisons aussi que les auteurs mentionnaient que les classes ne sont pas des catégories fermées puisqu'il y a toujours une transition d'un style à un autre. D'ailleurs en 2006, Burge (2006) remettait en question la définition de divagant exprimée par Church (1983) en comparant ses résultats avec ceux récoltés sur la rivière Fraser par Church en 1983. En effet, Burge (2006) soutient que les rivières divagantes du Nouveau-Brunswick, dans l'Est canadien, présentent les aspects morphologiques des rivières divagantes, mais affichent des paramètres, tels que le niveau d'énergie, la formation des bancs, le taux de migration et le ratio largeur/profondeur, plus proches de ceux des rivières à méandres. Enfin, malgré ces distinctions, ces auteurs s'entendent sur le fait que les rivières divagantes présentent une forte instabilité de leur morphologie dans le temps, associée à une charge de fond importante, à la migration du chenal, à la présence de bancs d'accumulation (Burge,

2005; Church, 1983; Church, 2009; Rice *et al.*, 2009) et d'embâcles de bois mort (Burge, 2006).

Le profil en plan des rivières divagantes, avec une prédominance de bancs composés créant des anabranches, présente généralement un patron peu régulier en regard des rivières à méandres. Les travaux de Church et Rice (2009) sur la rivière Fraser ont suggéré que ce type de rivière répondait également au trio fondamental des unités morphologiques des rivières alluviales : « *riffle-bar-pools* » et qu'une sinuosité comme celle des rivières à méandres existait à l'échelle du chenal principal (figure 1.5). Cette sinuosité serait conditionnée par des processus de sédimentation sur les bancs, en alternance avec des zones d'érosion. Ainsi, l'accrétion d'un banc se ferait au détriment du banc à l'aval par érosion (figure 1.5). Ce patron de développement rappelle le méandrement régulier du style à méandres. Church et Rice (2009) précisent que cette séquence est davantage perceptible lorsque les bancs et le tronçon sont à maturité. Selon les auteurs, cette maturité se définit lorsque l'apport local en sédiments diminue à l'apex des bancs médiaux. Les bancs d'accumulation et leur dynamique jouent donc un rôle critique dans la définition et l'évolution des rivières divagantes.

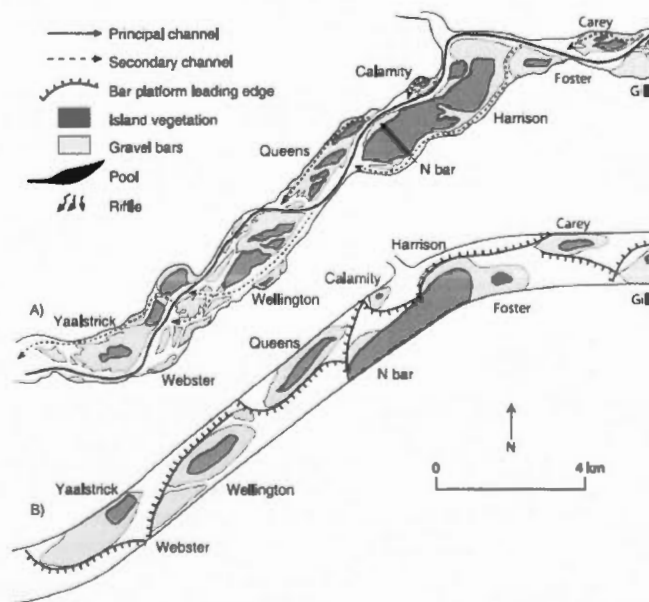


Figure 1.5 : Profil en plan d'une rivière divagante : sinuosité dans le chenal principal (haut), développement des bancs par accrétion/érosion (bas) (source : Church, 2009).

1.2.2 Dynamique des bancs d'accumulation

L'expression morphologique et végétative des bancs permet de distinguer deux styles fluviaux ayant une forte charge de fond : les rivières à tresses et les rivières divagantes. Les bancs dénudés et les îlots végétalisés sont une expression du comportement des cours d'eau renseignant sur les processus actifs et le régime des sédiments à l'échelle du tronçon (Burge, 2006). Les bancs des rivières divagantes présentent des comportements qui leur sont propres, avec un historique plus complexe, lié à leur longue durée de vie. En effet, les rivières divagantes sont caractérisées par la présence d'une charge en sédiments de fond modérée et de bancs composés stationnaires (Burge, 2006; Church, 2009) pouvant avoir une longévité centenaire (Church, 2009). Les divisions dans le chenal sont continues, mais moins intenses que dans les rivières à tresses (Rice *et al.*, 2009).

Les bancs composés (souvent des îlots végétalisés) sont définis ici comme des formes d'accumulation pouvant atteindre deux fois la largeur du chenal (Rice *et al.*, 2009). Ils sont composés de l'accrétion de plusieurs unités de banc primaire qui, elles, sont de dimension moindre. Ces dernières ne font que 0,2 fois la largeur du chenal et ont une histoire simple d'accumulation, contrôlée par des écoulements localisés (Rice *et al.*, 2009). La durée de vie des bancs des rivières divagantes se distingue nettement de celles des rivières à tresses qui est épisodique. Cette durée de vie limitée des bancs des rivières à tresses ne permet pas, ou que peu, la conversion de bancs composés en îlots végétalisés tel que cela se produit dans les rivières divagantes (Rice *et al.*, 2009).

Deux grandes familles de bancs composés ont été identifiées par Rice *et al.* (2009). On retrouve soit des bancs attachés sur une berge de manière saisonnière (les bancs latéraux), soit des bancs centraux (figure 1.6). La distinction entre ces deux types de bancs est particulièrement en lien avec le type d'écoulement dans le ou les chenaux secondaires, écoulement efficient seulement en période de crue pour les bancs latéraux attachés,

contrairement à une occupation continue pour les chenaux des bancs médiaux. Rice *et al.* (2009) ont proposé une typologie pour les unités primaires qui contribuent à l'accrétion des bancs composés. Cette typologie est surtout basée sur la morphologie des unités (figure 1.6). À l'amont, on retrouve ainsi des bancs d'apex amont, alors que dans le chenal secondaire, des bancs lobés migrent. Vers l'aval, se trouvent des bancs attachés sous forme de flèche.

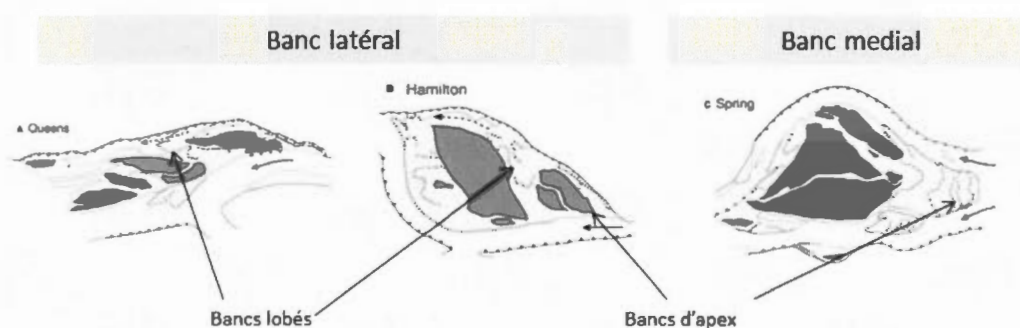


Figure 1.6 : Typologie des unités de bancs composés primaires (source : Rice *et al.*, 2009).

L'évolution des bancs dans les rivières divagantes suit une succession d'évènements caractéristiques (Church, 2009). En premier lieu, l'accrétion sur les jeunes bancs présente les taux sédimentaires les plus élevés, équivalents au taux de charge de fond annuel pour l'ensemble du tronçon. Puis, l'accrétion décroît, pour laisser place à de l'érosion vers le stade de maturité du banc. Les paramètres morphométriques en jeu indiquent une évolution allométrique entre la largeur et la longueur, où les bancs croissent d'abord en longueur puis en largeur. L'élévation du banc ne change pas avec le temps puisque, dès la croissance du banc, elle atteint un niveau donné (Rice *et al.*, 2009). Ce niveau est fonction de l'écoulement et de sa compétence à projeter des sédiments sur le dessus du banc.

L'évolution des bancs peut aussi être le résultat des dynamiques propres aux diffluences et aux processus d'avulsion. Burge (2006) a observé que les diffluences avaient aussi un historique d'évolution relié à l'anabranchement, de sa création à sa fermeture. Burge (2006) suggère que l'avulsion est le principal processus de création des bancs, puisque l'évolution

du banc s'observait par l'élargissement de l'anabranchement jusqu'à ce qu'elle partage équitablement l'écoulement avec le chenal principal. Enfin, il suggère également que l'aggradation du lit des deux chenaux contribuerait à diminuer peu à peu l'écoulement et provoquerait, à terme, l'abandon de cette anabranchement. Burge (2006) rappelle qu'à ce processus d'évolution s'ajoutent des variables extérieures qui peuvent provoquer l'abandon de l'anabranchement. Les embâcles de bois mort et de glace, de même que l'augmentation substantielle de la charge en sédiments, en sont des exemples. Les angles de bifurcation, mesurés entre le centre des chenaux des diffluences, sont de bons indices du stade d'évolution. Les angles forts (≥ 60 degrés) correspondent à des anabranches nouvellement créées alors que les angles de 40 degrés et moins correspondent à des chenaux relativement égaux et matures (Burge, 2006).

Ces connaissances sur la dynamique des bancs d'accumulation des rivières divagantes dans un contexte d'équilibre nous aident dans la compréhension de la réponse géomorphologique possible des bancs d'accumulation dans le cas de perturbations par excavation.

1.2.3 Transport de sédiments et bilan sédimentaire

Parce que le caractère des rivières est fortement influencé par la charge en sédiments et le débit, le bilan sédimentaire s'avère être un élément central en géomorphologie permettant de décrire la magnitude des processus et le taux de réponse, de même que la localisation et le moment de cette réponse (Reid et Dunne, 2003). Le bilan sédimentaire comporte quatre composantes : les entrées, le transport, l'entreposage et la sortie des sédiments du système géomorphologique (Reid et Dunne, 2003). Le système géomorphologique peut être considéré à plusieurs échelles, autant celle du bassin versant ($> 1\,000\text{ km}^2$) que celle d'un tronçon de rivière ($< 100\text{ m}^2$) (Reid et Dunne, 2003).

L'estimation du budget sédimentaire est une tâche complexe étant donné la difficulté de quantifier les quatre composantes. On reconnaît deux grandes approches de mesure du transport en charge de fond : (1) l'approche par mesure directe avec des trappes à sédiments et des sondes captant les sédiments en transport et (2) l'approche morphologique, qui utilise des relevés topographiques pour quantifier les changements de volume et inférer des taux de transport. Dans le cas de travaux ponctuels de dragage, une approche hybride consiste à réaliser des relevés topographiques en ciblant les fosses d'excavation comme trappes à sédiments; plutôt que d'utiliser des instruments qui piègent les sédiments. Cette méthode a été appliquée par Gob *et al.* (2005) et mentionnée par Rovira *et al.* (2005) comme approche intéressante d'estimation du taux de transport annuel. Neil (1971), (dans Pyrce et Ashmore, 2003), mentionne que la mesure du taux de migration historique des bancs peut être utilisée avec la hauteur des bancs pour estimer le volume déplacé dans un temps donné. Cette approche s'applique cependant aux rivières à méandres. Pour les rivières divagantes, Church et Rice *et al.* (2009) proposent la mesure de la migration des bancs comme indicateur du volume déplacé.

En plus des défis reliés à la mesure des volumes transportés, l'estimation de la distance de déplacement, selon le temps de transport ou le type d'événements de transport, demeure une autre question complexe. Cette notion de distance de déplacement avait été évoquée par Einstein dès 1937 (dans Pyrce, 2003) comme composante importante, en complément du volume, pour l'estimation du taux de transport de sédiments sur le lit. Pyrce et Ashmore (2003) soutiennent, après une ré-analyse de diverses études, que la distribution des distances de déplacement des sédiments moyens (D50) lors d'un événement de mobilité correspond à la distance entre le seuil et la mouille dans un système morphologique. Quoique les événements de mobilité soient en lien avec la force hydraulique du cours d'eau, la modalité d'entraînement des sédiments demeure, elle aussi, une autre question où deux théories se confrontent (Powell, 1998). D'une part, l'entraînement sélectif préconise un entraînement proportionnel entre la granulométrie et la contrainte de cisaillement, qui représente la force hydraulique appliquée au lit (Shield, 1936 dans Powell, 1998). D'autre

part, l'entraînement en équimobilité préconise un entraînement simultané de toutes les tailles de sédiments lorsque la résistance des sédiments du lit à l'entraînement est rompue (Parker, 1982a dans Powell, 1998). Cette dernière hypothèse se base sur le principe que la taille des sédiments n'est pas le seul facteur de résistance à l'entraînement. Les autres éléments de résistance sont l'angle de pivot des sédiments, l'élévation du lit et l'élévation des protrusions locales (Powell, 1988).

Par exemple, en utilisant la prémisse d'un entraînement en équimobilité, Lamarre et Roy (2008) ont déterminé, dans un système marche-cuvette, un seuil hydrologique de mobilité (débit spécifique critique) afin de calculer le nombre d'évènements de mobilité. Ce seuil a été déterminé, pour cet environnement à $0,5 \times Q_{bk}$, soit 50 % du niveau plein bord lorsque 25 % des cailloux D50 témoins ont été en mouvement. Quoique le système marche-cuvette diffère fortement du système divagant, notamment par une pente forte et la présence de blocs, l'approche de détermination d'un seuil hydrologique y est intéressante.

Selon Rice et Church (1998), le transport de sédiments ne peut être examiné sans évaluer les sources de sédiments. Les auteurs mentionnent qu'en plus d'un gradient granulométrique diminutif de l'amont vers l'aval, à l'échelle du bassin versant, il était possible d'observer ce même phénomène à l'échelle d'un tronçon. À cette échelle, une distribution en dents de scie de la granulométrie permet de relier les sources sédimentaires au triage granulométrique (Rice et Church, 1998). En plus des sources majeures de sédiments, telles que les colluvions de versants, les tributaires et les dépôts quaternaires pouvant affecter la distribution granulométrique, les alluvions contenues dans la plaine alluviale et les formes telles que les bancs constituent des sources de sédiments qui peuvent être remobilisés par le cours d'eau.

Dans le cadre des travaux réalisés sur la rivière de l'Anse Pleureuse, nous nous intéresserons à évaluer le transport annuel par le biais de l'approche hybride, qui consiste à relever la topographie de la fosse avant et après les travaux pour estimer le volume annuel qui, selon

Marston *et al.* (2003), correspond au taux annuel de transport de sédiments. Nous nous intéressons également à décrire le transport et la distance de déplacement, observés par le biais de traceurs.

1.3 Perturbations par excavation et réponses géomorphologiques

Les perturbations du régime sédimentaire ont des impacts sur la morphologie des cours d'eau (Kondolf, 2002). L'aménagement du territoire et la foresterie sont des activités ayant des implications sur le régime sédimentaire, mais l'extraction de sédiments et l'aménagement de barrages sont reconnus comme les deux activités anthropiques ayant le plus d'incidences sur le régime sédimentaire des rivières et, par conséquent, sur la dynamique morphologique des cours d'eau (Kondolf, 1997; Rovira, 2005). Cette section s'intéresse aux principaux éléments impliqués dans la question de l'extraction de sédiments, à savoir : le type de travaux, les impacts anticipés et observés, la trajectoire géomorphologique de même que les approches de planification des travaux d'excavation.

1.3.1 Type de travaux d'excavation de sédiments

Les travaux d'excavation de sédiments dans les rivières ont été largement conduits au cours du dernier siècle afin de répondre à des besoins en matériaux graveleux (Kondolf, 1994; Surian, 2003; Gob *et al.*, 2005). Le nombre d'études sur le sujet est considérable et dénote l'intérêt des géomorphologues à comprendre l'impact morphologique de ces travaux (Graf, 1979; Surian, 2003; Marston, 2003; Kondolf, 1994, 1997, 2001, 2002; Rovira, 2005). Aujourd'hui, plusieurs pays d'Europe ont adopté des politiques de restriction de ce type d'activités (Kondolf, 2002; Surian, 2003; Marston, 2003; Gob *et al.*, 2005). Certains pays permettent encore les activités d'extraction de sédiments pour des fins de contrôle des inondations, notamment en Belgique et en Angleterre (Gob *et al.*, 2005; Wishart *et al.*, 2008). Aux États-Unis et au Canada, l'extraction de sédiments se poursuit dans plusieurs

rivières malgré l'opposition du public et la reconnaissance par les agences des effets négatifs de cette pratique (Kondolf, 1997).

Les interventions d'excavation aux fins de contrôle des inondations diffèrent fortement des interventions de dragage commercial par la quantité de sédiments excavés, qui est de moindre envergure, et par des interventions plus ponctuelles dans le temps (Gob *et al.*, 2005; Wishart *et al.*, 2008). Ces interventions sont le plus souvent planifiées en réponse à l'évolution du chenal et à l'évaluation des risques d'inondation. Toutefois, notons que les travaux visant à atténuer le risque d'inondation peuvent aussi avoir un historique notable de la même ampleur que les interventions commerciales (Marston, 2003). Dans plusieurs cas, l'extraction commerciale a été promue sur la base de la prévention des inondations (Kondolf, 1994). Tel est le cas de la rivière Malnant en France, où une incision de près de 7 m résulte d'excavations entre 1918 et 1960, réalisées pour atténuer le risque d'inondation (Marston, 2003).

Kondolf (1994) reconnaît trois types d'excavation réalisés dans le chenal actif : l'excavation de fosses sèches, l'excavation de fosses mouillées et l'écrémage des bancs. L'excavation de fosses sèches et mouillées est réalisée en-dessous du talweg dans une section transversale. L'excavation de fosses sèches s'effectue dans un chenal éphémère alors que l'excavation de fosses mouillées se réalise en dessous du niveau de l'eau. L'écrémage des bancs constitue un scalp de la couche supérieure, sans excaver le dessous du niveau d'eau d'été. L'écrémage des bancs peut aussi s'effectuer sur les radiers (Gob *et al.*, 2005). L'excavation sur la plaine alluviale, ou sur une terrasse adjacente au chenal, ne constitue pas une intervention directement dans le chenal, mais cette condition n'est qu'éphémère dans bien des cas, en raison de la capture de la fosse par la rivière lors d'un coup d'eau important (Kondolf, 1994).

Outre ces types classiques de techniques d'excavation par fosse ou par écrémage des bancs, Karle et Kenneth (2007) ont testé d'autres approches d'excavation, soit (1) parallèle à l'écoulement, (2) perpendiculaire à l'écoulement et (3) en imitant la géométrie en plan du

chenal. Ces approches impliquent des excavations de faible intensité dans un but d'évaluer l'approche la moins dommageable d'extraction comme stratégie de source alternative d'agrégat de construction (Karle et Kenneth, 2007).

Le type de tronçon de rivière où ont eu lieu des interventions de dragage présente souvent un style fluvial qui est soit à tresses, soit divagant (Surian et Rinaldi, 2003). Ces tronçons situés en piémont et dans la plaine alluviale ont une charge en sédiments importante, ce qui explique l'intérêt à les exploiter. Des travaux de dragage dans les tronçons à méandres, tels que sur la rivière Semois en Belgique (Gob *et al.*, 2005) ou dans les tronçons torrentiels, tels que sur la rivière Malnant en France (Marston *et al.*, 2003), sont plus rares. Toutefois, dans bien des cas, les rivières présentent un historique complexe de dragage et il demeure difficile d'identifier le style fluvial initial (Surian et Rinaldi, 2003). Marston *et al.* (2003) mentionnent à ce sujet que plusieurs rivières des Alpes ont l'expérience des métamorphoses entre les styles à méandres et à tresses, selon la variation et les changements dans la charge en sédiments, issus de la perturbation du régime sédimentaire.

1.3.2 Impacts morphologiques

Les impacts morphologiques des travaux historiques d'excavation observés comprennent, entre autres, la réduction de la largeur du chenal actif et l'abaissement du niveau du lit par incision. Rovira *et al.* (2005) observent sur la rivière Tordera, une incision générale de 1,5 m, atteignant 3 m par endroits. Sur la Drôme, seulement entre 1947 et 1970, la largeur a diminué de 60 % (figure 1.7) (Kondolf, 2002). Sur 27 cas étudiés en Italie, Surian et Rinaldi (2003) observent des rétrécissements des chenaux de souvent plus de 50 % et des cas d'incision de 3 à 4 m sont généralisés alors qu'ils peuvent atteindre quelques fois 10 m. Dans le cas de torrents, l'incision de quelques mètres et d'au plus 10 m a été arrêtée par des larges blocs, mais l'érosion latérale a alors été exacerbée (Marston *et al.*, 2003). Kondolf (1994) mentionne que, dans certains cas, l'incision peut aussi se poursuivre dans l'assise rocheuse, selon le type d'affleurement rocheux.

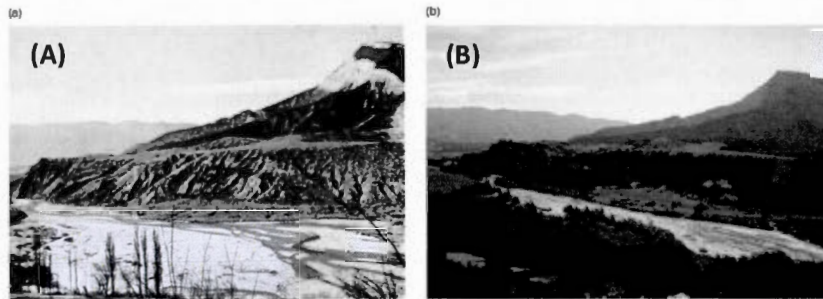


Figure 1.7 : Photographie de la rivière Drôme draguée : large lit à tresses en 1900 (A); lit divaguant en 1996 (B) (source : Kondolf, 2002).

Il est admis que la fosse d'excavation altère l'équilibre du profil du lit et que le chenal tend à ajuster le profil local de la pente (Kondolf, 1997; Rovira, 2005). Cet ajustement se produit vers l'amont par érosion régressive et vers l'aval par érosion progressive et tend à trapper les sédiments à l'intérieur de la fosse (figure 1.8) (Kondolf, 1997; Rovira, 2005). La propagation de l'érosion peut alors se faire sentir sur des kilomètres (Kondolf, 1994).

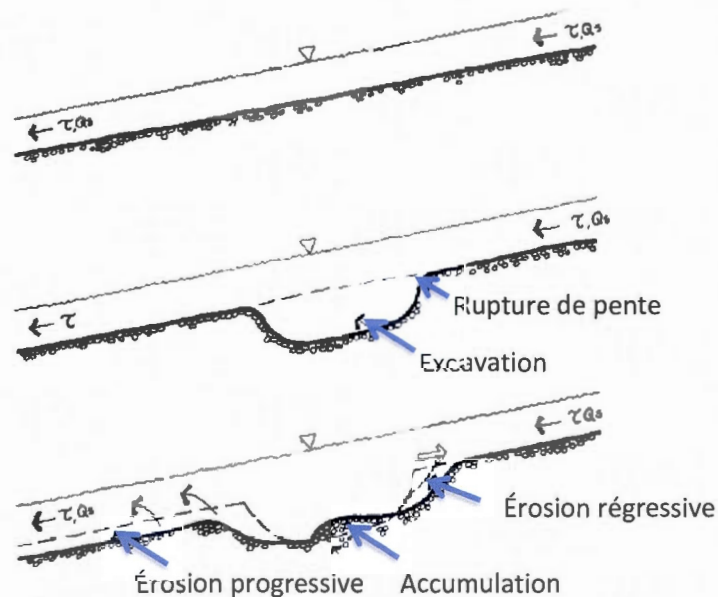


Figure 1.8 : Schéma sur les processus d'érosion régressive vers l'amont et d'érosion progressive vers l'aval après des travaux d'excavation de sédiments dans le chenal. (source : Kondolf, 1994; Kondolf, 1997).

Par exemple, l'érosion régressive et l'érosion progressive ont été citées comme processus majeurs d'ajustement sur la Malnant (figure 1.9) (Marston *et al.*, 2003). À l'érosion progressive des fosses d'excavation s'est ajoutée de l'érosion régressive, provenant d'un changement du niveau de base à la confluence induit par l'incision de la rivière Fier également excavée (Marston *et al.*, 2003). Des affleurements de l'assise rocheuse ont toutefois permis d'arrêter la progression de l'érosion régressive. Sur la Wear, en Angleterre, Whishart *et al.* (2008) mentionnent que des seuils ont dû être aménagés pour arrêter l'érosion régressive. Toutefois, l'érosion a été exacerbée à l'aval de la structure. Les seuils artificiels ont dû être restaurés à plusieurs reprises.

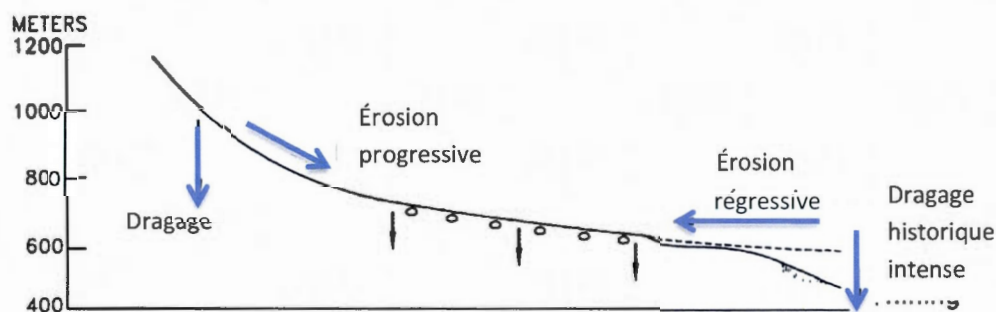


Figure 1.9 : Processus d'érosion progressive et régressive sur la rivière Malnant au 20^e siècle, en réponse à des travaux d'excavation de sédiments (source : Marston *et al.*, 2003).

Les travaux d'extraction à l'intérieur du chenal détruisent également le pavage et rendent le lit instable (Kondolf, 1994). Une augmentation de la granulométrie s'observe dans les lits des rivières excavées (Kondolf, 1994; Marston *et al.*, 2003) en raison d'un lessivage de sédiments fins du lit excavé, laissant un nouveau pavage grossier de galets et de blocs (Kondolf, 1994). Par ailleurs, l'augmentation de la granulométrie est souvent un processus difficile à évaluer en raison d'absence de données initiales (Kondolf, 1994). Même dans le cas de travaux de moindre envergure, tels que l'écramage des bancs, l'enlèvement du pavage déstabilise le lit. Ainsi, la surface grossière qui règle le taux de transport est enlevée et les sédiments plus fins sont exposés au transport (Kondolf, 1994).

Surian et Rinaldi (2003) ont dressé, à partir de 27 cas de dragage historique en rivière, les différents styles d'ajustements morphologiques. Ils ont observé des distinctions entre les réponses des systèmes selon le style fluvial d'origine (figure 1.10). Leurs travaux reconnaissent ainsi que les rivières dont le style est à tresses (C) vont évoluer vers des rivières de style divagant (FH) ou simplement diminuer leur indice de tressage (G). Les rivières de style divagant (B) vont évoluer vers des rivières à méandres (D) ou diminuer leurs largeurs et s'inciser (E). Dans le cas de rivières à méandres (A), la dynamique de migration latérale serait minime et l'incision serait l'ajustement principal (D-I). D'ailleurs, selon les résultats relevés par Surian et Rinaldi (2003), la relation entre l'ajustement latéral et l'incision est inversement proportionnelle entre les rivières à tresses où l'ajustement latéral est plus important comparativement aux rivières à méandres où l'incision est prédominante.

Pour les rivières divagantes (B), l'incision est de légère à modérée et, dans certains cas, le style bascule vers le style de chenal simple à méandres (Surian et Rinaldi, 2003). Whishart *et al.* (2008) dont les travaux ont été conduits sur la rivière Wear, de style divagant, observent des résultats similaires. Kondolf (1994) mentionne un cas encore plus dramatique de métamorphose entre le style à tresses et le style à méandres incisé sur une rivière russe près de Headsburg. Cette situation est le résultat d'extraction intensif de sédiments entre 1950 et 1960. L'incision du lit y est de 3 m sur 11 km, avec un maximum de 6 m d'incision.

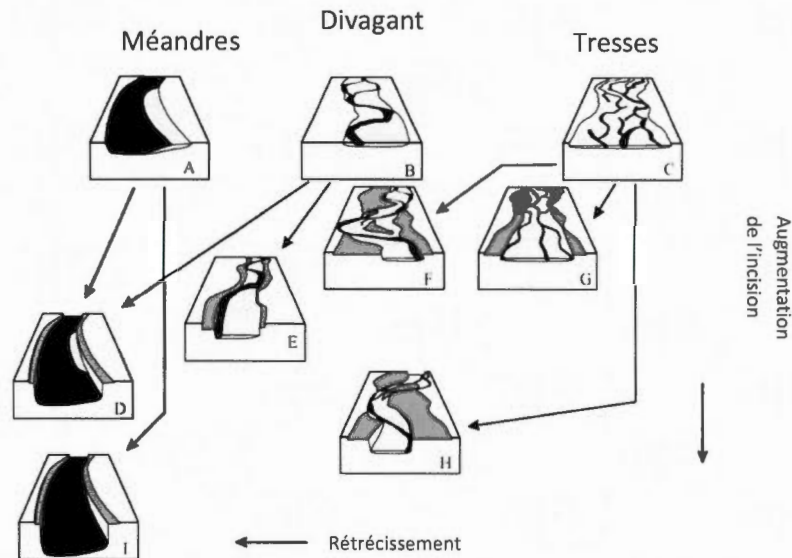


Figure 1.10 : Croquis des impacts morphologiques à long terme des travaux d'extraction de sédiments dans les cours d'eau de style à méandres, divagant, à tresses. (source : Surian et Rinaldi, 2003).

L'abaissement du niveau du lit affecte les infrastructures. Dans plusieurs cas, les infrastructures telles que les piliers de pont ont été construites par rapport à un niveau supérieur du lit du cours d'eau et l'incision de celui-ci déstabilise ces structures par affouillement (Kondolf, 2002; Marston *et al.*, 2003; Surian et Rinaldi, 2003; Rovira, 2005) (figure 1.11.A-B). Dans certains cas, tel que la rivière Brenta en Italie (Surian et Rinaldi, 2003) et de la rivière Tordera en Espagne (figure 1.11.C), l'affouillement a conduit à l'effondrement du pont (Rovira, 2005). L'incision du lit peut également affecter des infrastructures sur le long des berges telles les routes, par de l'affouillement et de l'érosion (Kondolf, 1994; Marston *et al.*, 2003).



Figure 1.11 : Affouillement d'un pilier de pont sur la rivière Arno, incision de 6 m (A) (source : Surian et Rinaldi, 2003); Affouillement sur la rivière Stony Creek (B) (source : Kondolf, 1994); Effondrement d'un pont sur la rivière Tordera (C) (source : Rovira, 2005).

D'autres impacts indirects, tels que la perte de diversité des habitats (Surian et Rinaldi, 2003; Tecsalt, 2009), la diminution de la quantité de sédiments au littoral et la diminution de la nappe phréatique, sont mentionnés dans la littérature comme étant des impacts découlant de l'excavation (Kondolf, 1997; Surian et Rinaldi, 2003; Rovira, 2005). Par exemple, Kondolf (1997) mentionne que la cellule hydrosédimentaire « *Oceanside* » en Californie a été amputée de 40 % de l'apport de sédiment fluvial, par l'érection de barrages et le dragage sur ses principales rivières.

Enfin, le fait que l'écrémage des bancs ne résulte pas en fosse provoque des impacts de moindre envergure que l'excavation par fosse. Par contre, Kondolf (1994) mentionne que l'impact sur l'habitat est profond puisque la morphologie est transformée en une grande section plate et que l'élimination du confinement de l'écoulement résulte en un écoulement en mince couche d'eau, situation non favorable aux espèces aquatiques.

Dans le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse, nous nous intéressons à observer et décrire les impacts morphologiques résultant des ajustements induits par les processus d'érosion régressive et d'érosion progressive.

1.3.3 Temps de réponse et trajectoire morphologique

Les ajustements morphologiques en réponse aux perturbations de dragage ont été qualifiés d'asymptotiques, soit de rapides au début, puis de lents (Surian et Rinaldi, 2003). Ils ne surviennent qu'après un évènement hydrologique morphogène durant l'année subséquente aux travaux, en raison du transport de sédiments requis pour effectuer ces changements (Kondolf, 1994).

À l'échelle historique, des tendances des ajustements peuvent être perceptibles et être clairement associées à des épisodes de perturbations (Surian et Rinaldi, 2003). Par exemple, sur la rivière Arno et la rivière Po (figure 1.12), les deux phases d'ajustement par incision du lit correspondent respectivement à des épisodes distincts de perturbation du régime sédimentaire. La première moitié du 19^e siècle correspond à une période de canalisation et de détournement généralisés pour protéger des inondations et répondre aux besoins en agriculture (Surian et Rinaldi, 2003). À ces interventions se sont ajoutés, au milieu du siècle, des travaux d'édification de barrages et d'extraction de sédiments qui ont eu pour conséquence d'augmenter la magnitude des ajustements, dont l'ampleur de l'incision (Surian et Rinaldi, 2003).

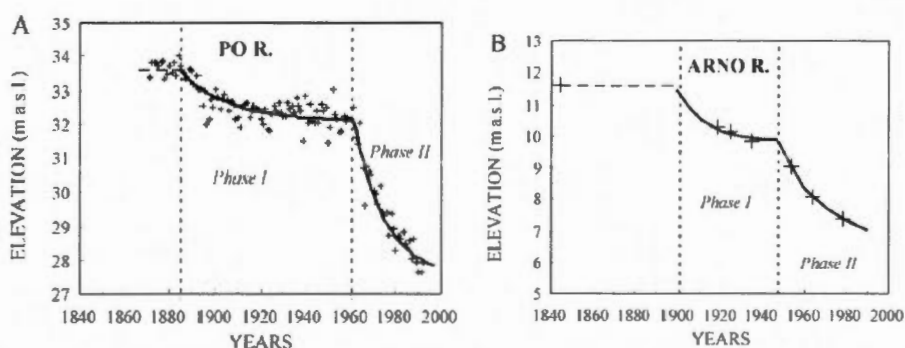


Figure 1.12 : Ajustement de la hauteur de sections transversales des lits des rivières Po (A) et Arno (B) au cours du dernier siècle (source : Surian et Rinaldi, 2003).

La magnitude des changements morphologiques observés sur les rivières italiennes en lien avec la diminution de la charge en sédiments due au dragage sont de l'ordre de changements naturels qui pourraient survenir sur une période de 1 000 ans (Surian et Rinaldi, 2003).

Le système fluvial a-t-il la capacité de restituer un état morphologique antérieur? Il a été documenté que l'arrêt des travaux d'excavation conduit à une aggradation du lit. Le temps de résilience étant proportionnel à l'importance des volumes de sédiments excavés du système. Par exemple, Rovira *et al.* (2005) estiment à l'aide de budget sédimentaire que la rivière Tordera pourrait retrouver son état pré-extraction en 420 ans. Dans d'autres cas, il est possible que le système ait dépassé un seuil et que le retour à un état antérieur ne soit pas possible (Gob *et al.*, 2005).

Pour les travaux de moindre ampleur, le temps de résilience est estimé à une échelle pluriannuelle. Sur la rivière Semois, le temps de résilience est estimé à 10 ans (Gob *et al.*, 2005). Sur la Toklat, le temps de résilience a été évalué à 3 mois pour la technique dont la résilience était la plus rapide (Karle et Kenneth, 2007). Ces cas sont toutefois marginaux en comparaison des cas de dragage historiques dans les Alpes, en Italie et aux États-Unis.

La compréhension de la trajectoire géomorphologique historique, en lien avec les ajustements aux perturbations, constitue ainsi une voie à privilégier afin de déterminer une approche de gestion ou de restauration optimale en vue de la trajectoire géomorphologique à venir. Pour Ziliani et Surian (2012), l'analyse de cette trajectoire ne peut se faire sans une analyse quantitative des changements, des facteurs de contrôle et des liens entre les changements et les facteurs de contrôle. Ziliani et Surian (2012) soulignent que l'interprétation de changements à la suite d'un événement majeur est une chose, mais que la distinction de la part relative de chaque facteur de contrôle en est une toute autre lorsque plusieurs facteurs de contrôle sont en changement simultanément. Une approche mixte d'analyse classique de changement morphologique et de modélisation est préconisée

par Ziliani et Surian (2012) pour développer un modèle et anticiper les changements à venir d'un système hydrogéomorphologique.

1.3.4 Stratégie de planification des travaux

Les stratégies de planification de travaux de dragage ponctuels en vue de limiter le risque d'inondation étant limitées ou absentes, celles développées dans le de dragage commercial peuvent servir de référence. À cet effet, Kondolf (1994) a identifié deux stratégies contemporaines de planification du volume d'excavation de sédiments en rivières utilisées en Californie, soit celle qui utilise l'approche de la ligne rouge critique et celle qui s'appuie sur l'analyse du budget sédimentaire.

La première stratégie consiste à définir un seuil en dessous duquel l'excavation est prohibée. Le problème majeur relié à cette approche est que la conception de limites est définie en fonction de la position ponctuelle du lit et non pas en fonction de données historiques d'élévation du lit de cours d'eau (Kondolf, 1997). Cette lacune ne permet pas d'évaluer l'impact des travaux dans le contexte historique et peut amener à l'incision du lit. La deuxième stratégie fait intervenir le budget de sédiments. Elle consiste en une estimation du budget annuel du tronçon et à limiter l'extraction annuelle à cette valeur ou à une portion de celle-ci (Kondolf, 1997; Surian et Rinaldi, 2003; Wishart *et al.*, 2008). Puisque l'ampleur des ajustements du chenal face à l'extraction du gravier est régie par la quantité et le taux d'enlèvement des sédiments de la rivière (Kondolf, 1994, 1997; Rinaldi *et al.*, 2005; Langer, 2009), cette limite est définie en fonction de l'estimation des impacts selon le ratio de sédiments prélevés sur le taux de transport annuel.

Les stratégies historiques de planification ayant été employées sont éloquentes concernant leur inefficacité. Par exemple, le taux d'extraction des sédiments excavés sur la rivière Tordera en Italie entre 1956 et 1987 a été estimé après coup à plus de 14 fois la charge annuelle (Marston *et al.*, 2003). Sur la rivière San Luis, en Californie, l'extraction a été 50 fois plus importante que la charge (Kondolf, 1997). De manière généralisée, dans plusieurs

rivières, le taux d'extraction de sédiments est d'un ordre de magnitude plus important que la quantité de sédiments provenant du bassin (Kondolf, 1994; Kondolf, 1997). Il y a peu de cas documentés où l'extraction n'a pas affecté significativement la morphologie. L'un d'eux est la rivière Toklat en Alaska, où l'excavation a été de 5 % la charge de fond annuelle (Karle et Kenneth, 2007), de même que celui de la Fraser (Rempel, 2004). Rappelons que ces deux cas se sont déroulés dans le cadre d'études stratégiques. Par ailleurs, dans l'état de Washington, le taux d'extraction limite avec effets mimines sur le saumon est estimé à 50 % de la charge annuelle. Toutefois, (Kondolf, 1994) mentionne que même avec un taux d'excavation équivalent à la charge annuelle ou moindre, l'extraction occasionne en elle-même une perte de sédiments pour les tronçons en aval qui eux, seront modifiés.

Enfin, Kondolf (1997) mentionne que les stratégies contemporaines sont basées sur des équations empiriques et qu'il demeure impossible à ce jour d'avoir des estimations fiables en raison de la complexité du transport de sédiments. L'utilisation des équations pour la planification des travaux devrait être utilisée uniquement après une évaluation et un jugement critique de la fiabilité des calculs pour le contexte la rivière étudiée (Kondolf, 1994). La modélisation est également utilisée, mais celle-ci demeure une simplification d'un système naturel complexe qui est encore mal compris (Kondolf, 1994). Elle peut apporter des éléments utiles à l'analyse budgétaire, mais ne devrait pas être utilisée seule.

L'estimation d'un budget est complexe en raison de la variabilité du transport en charge de fond dans le temps et dans l'espace et en fonction de la difficulté de la mesure de cette charge (Kondolf, 1994). Pour Kondolf (1997), l'une des approches pour pallier la variabilité interannuelle est de baser l'estimation non pas sur les rendements annuels moyens, mais sur les nouveaux apports de sédiments annuels. Des équations ont été développées pour estimer empiriquement la charge annuelle, mais l'un des problèmes ciblés est qu'elles sont basées sur l'énergie disponible, sans intégrer les changements dans les charges de sédiments (Kondolf, 1994). Un cas de figure concerne la Drôme où les politiques d'extraction étaient basées sur l'équation de Meyer-Peter et Muller. Rappelons qu'entre

1947 et 1970, la largeur du cours d'eau a diminué de 60 % en raison de la pression exercée par l'extraction de sédiments (Kondolf, 2002). L'équation utilisée prédit la capacité de charge, qui est équivalente à la charge seulement lorsque l'apport en sédiments est égal ou excède la capacité de transport; ce qui n'était pas le cas de la Drôme qui accusait davantage un déficit (Kondolf, 2002).

Vu la complexité du transport de sédiments et l'incapacité à prédire avec des modèles et la variété des influences humaines et naturelles sur le système fluvial, le meilleur outil pour prédire le comportement futur d'une rivière est tiré de son comportement passé (Kondolf, 1994). À cet effet, Kondolf (1994) souligne la nécessité de recourir à l'analyse historique des changements morphologiques pour amener une compréhension des processus responsables des conditions présentes. Cette analyse historique, réalisée avec des photos aériennes historiques, des cartes, des plans, des informations ou des données sur l'élévation du lit, sur l'évolution historique du chenal et sur l'utilisation de l'arrière-pays permet de dresser un portrait du comportement du cours d'eau (Kondolf, 1994) et notamment de sa trajectoire hydrogéomorphologique au regard de son régime sédimentaire.

Les divers impacts recensés sur plusieurs cours d'eau, en lien avec des taux d'extraction inadéquats, illustrent bien la nécessité d'une planification plus judicieuse des travaux, mais surtout d'une limite d'extraction en regard de la charge disponible dans le système fluvial. Pour Kondolf (1994), trois approches sont complémentaires. Premièrement, l'estimation du budget est essentielle pour analyser le taux relatif de transport. Deuxièmement, l'analyse historique est essentielle à une compréhension à long terme du contexte des conditions actuelles. Enfin, la modélisation peut être utilisée pour évaluer différentes alternatives de gestion, mais seulement après une calibration à partir de données de la rivière.

Dans le cas de travaux de prévention des inondations, la planification même de travaux au regard de cette justification doit être bien évaluée. En effet, s'il est admis que l'abaissement du niveau du lit diminue le niveau d'eau et donc les risques d'inondation (Kondolf, 1994),

cette notion serait peut-être davantage effective lorsqu'il y a incision du lit sur plusieurs kilomètres dans le cas de travaux de dragage historiques, généralisés et récurrents. À l'opposé, les travaux ponctuels et localisés d'excavation d'une fosse ne généreraient pas un abaissement significatif du niveau d'eau. Cet aspect a été relevé sur la Semois où des mesures hydrologiques ont été réalisées à la suite des travaux de dragage ponctuels et localisés. Les résultats ont indiqué que l'approche n'avait que des effets minimes sur la diminution du niveau d'eau et constituait une voie inefficace (Gob *et al.*, 2005). La diminution enregistrée du niveau d'eau pour un même débit ne serait que de quelques centimètres. Gob *et al.* (2005) précisent également que cette approche n'est que temporaire puisque le cours d'eau tend à reprendre sa forme initiale en moins de 10 ans.

En plus du volume de sédiments, Karle et Kenneth (2007) précisent que certaines techniques d'excavation peuvent être plus adéquates, dont notamment celle qui est réalisée en imitant la géométrie en plan du chenal. Germanoski (2001) mentionne de manière plus générale que les techniques d'extraction doivent être effectuées pour faciliter la restauration naturelle avec une compréhension de la dynamique fluviale du tronçon travaillé.

Dans le cas des travaux à la rivière de l'Anse Pleureuse, nous nous intéressons à utiliser les deux premières approches mentionnées par Kondolf (1994), soit l'analyse historique de la trajectoire géomorphologique et l'estimation du transport pour évaluer la magnitude des travaux dans le système.

1.4 Problématique et objectifs

Le régime sédimentaire de la rivière de l'Anse Pleureuse amène une forte sédimentation dans un tronçon alluvial et est responsable de la problématique d'aggradation du lit qui affecte ce tronçon au droit du pont P-02275 du MTQ (Poirier et Niquet, 1992). En effet, au droit du pont de la route 198, l'aggradation du lit a obligé la réalisation de travaux de dragage (de 4 930 m², correspondant à 290 m * 1,5 m de profondeur) et l'aménagement

d'un enrochement (d'une longueur 50 m) à l'automne 2009 (Rhéaume, 2009). Ces travaux avaient comme objectif d'augmenter l'espace libre entre le pont et le lit de la rivière afin de prévenir le risque d'inondation (Rhéaume, 2009).

Actuellement, c'est en réaction aux aléas des systèmes fluviaux que ces interventions sont réalisées. Elles se font sans une compréhension adéquate des processus hydrosédimentaires et des liens entre les unités morphodynamiques du cours d'eau. D'une part, l'absence d'évaluation de la dynamique fluviale focalise l'attention des gestionnaires sur les effets d'un processus et non sur les causes. D'autre part, l'absence de considération de la dynamique fluviale amène à réaliser des travaux qui s'intègrent parfois mal à l'environnement et peuvent avoir comme effet inverse d'accentuer certains processus dont le résultat peut s'avérer non désiré. Cette situation s'explique par le fait que :

- Les connaissances en matière de morphodynamique d'une rivière divagante soumise à des perturbations sont déficientes;
- Le volume qui peut être prélevé sans impacts significatifs, de même que les méthodes idéales de prélèvement, sont des informations encore absentes pour les rivières divagantes;
- Au Québec, on ne dispose d'aucun cadre d'analyse hydrogéomorphologique pour évaluer les impacts des travaux de dragage en rivière.

La réalisation d'une étude sur les impacts de travaux de dragage en rivière est une opportunité de mieux connaître le contexte dans lequel s'insèrent les travaux et, également, d'acquérir des connaissances en vue de l'élaboration d'un cadre d'analyse essentiel à l'étude de problématiques similaires.

Le but visé par ce projet est de documenter, par le biais d'un diagnostic hydrogéomorphologique, la réponse morphodynamique d'une rivière divagante en milieu montagnard gaspésien soumise à des travaux de dragage. Notre hypothèse de recherche est

que l'érosion régressive, issue de travaux d'excavation de sédiments, peut modifier la morphologie d'une rivière divagante. Parallèlement, l'étude porte une réflexion sur la place de la discipline géomorphologique dans le processus de planification de travaux en rivières.

Trois objectifs spécifiques sont poursuivis pour atteindre le but de l'étude :

Objectif 1 : Analyser la dynamique fluviale historique

Il est nécessaire de connaître la dynamique fluviale historique pour qualifier le comportement du système, c'est-à-dire sa trajectoire hydrogéomorphologique. La dynamique fluviale historique renseigne sur les événements, leur magnitude et sur les réponses du système en regard de ces événements. Elle permet en outre de comprendre l'état d'équilibre dans lequel le système se trouve ou alors la trajectoire poursuivie. Cet objectif fait intervenir des variables de la morphologie du chenal (largeur, bancs, style, position du lit), dépendantes des variables suivantes : régime hydrologique, régime sédimentaire et événements hydrosédimentaires.

Objectif 2 : Quantifier les interventions d'excavation et les positionner dans le contexte de la dynamique fluviale actuelle du tronçon

La quantification de l'intervention de dragage est nécessaire afin de positionner la magnitude de la perturbation dans le contexte de l'état du système. Cet objectif fait intervenir les variables topographie et granulométrie, qui sont dépendantes de la variable temps, soit avant et après les travaux. Cet objectif fait également intervenir les variables volume excavé et charge sédimentaire annuelle.

Objectif 3 : Documenter les processus d'ajustement de la morphologie du chenal

La documentation des processus d'ajustement de la morphologie concerne l'analyse des ajustements morphologiques sur une période de deux ans après les travaux. Cet objectif fait intervenir les variables topographie, granulométrie, profil en long, dépendantes de la variable temps, soit sur la période se situant après travaux et s'étirant sur deux ans.

CHAPITRE II

SITE D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE

Le chapitre II s'applique à décrire le site d'étude et à détailler la méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs ciblés. La caractérisation du site comprend la localisation du site d'étude et une description de la géographie physique de la région d'étude, incluant la géologie, l'héritage quaternaire, le type de rivière, les sources de sédiments, l'hydrologie et la torrencialité. La partie traitant de la méthodologie est, pour sa part, divisée en deux sections comprenant une description des méthodes d'analyses historiques et une description des méthodes d'analyses des données récoltées durant la période d'étude respectivement.

2.1 Caractérisation du site d'étude

2.1.1 Localisation

La rivière de l'Anse Pleureuse est située au Canada, dans la province du Québec, dans la MRC de La Haute-Gaspésie. D'une longueur totale de 23 km, la rivière de l'Anse Pleureuse prend sa source près de Murdochville, et se déverse dans le fleuve Saint-Laurent au niveau de la municipalité de l'Anse Pleureuse. La route 198, reliant le nord de la Gaspésie à Murdochville, longe en partie la rivière de l'Anse Pleureuse, en empruntant la vallée édifiée par la rivière et par les langues glaciaires (figure 2.1). Le site d'étude porte sur un tronçon de 500 m de la rivière, en amont et en aval du pont P-02775. Le pont P-02775 est situé sur le territoire de la municipalité de Saint-Maxime-du-Mont-Louis et traverse la rivière à 8,3 km de son exutoire au fleuve Saint-Laurent.

Comme nous le décrivons plus en détails ci-après, la rivière de l'Anse Pleureuse est une rivière de type divagante. Son bassin versant est faiblement utilisé. Les activités anthropiques concernent essentiellement la route, de niveau national, reliant le nord de la Gaspésie à Murdochville, la foresterie sur le plateau et les versants et de nombreux chemins d'accès aux secteurs de coupe. On note également de l'acériculture artisanale et autres projets pastoraux dans le fond de la vallée.

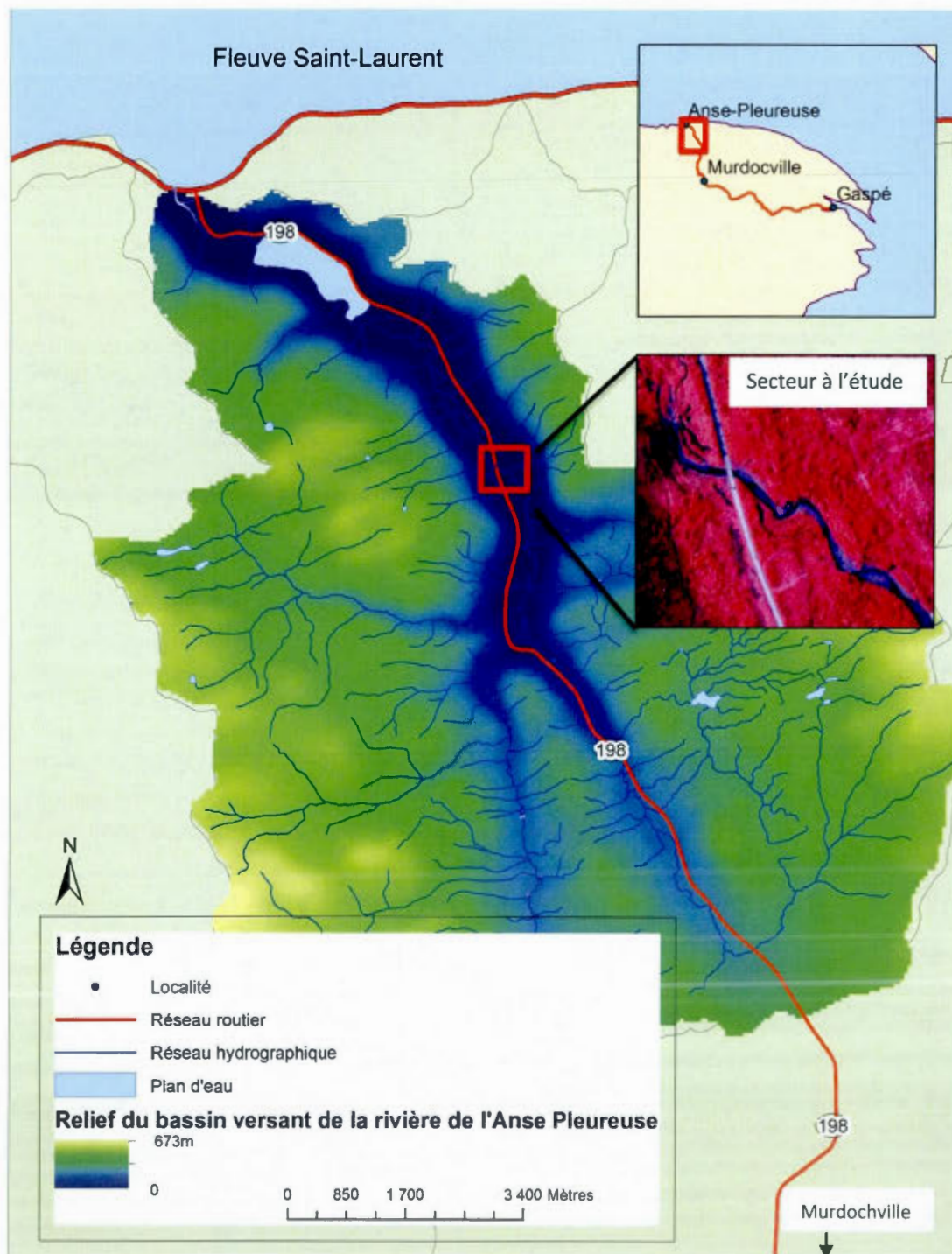


Figure 2.1 : Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la rivière de l'Anse Pleureuse.

2.1.2 Géographie physique régionale

La topographie régionale est organisée en trois plateaux : le plateau gaspésien (400-600 m), le plateau des Chics-Chocs (750-900 m) et le plateau des monts McGerrigle et Albert (1 000-1 100 m) (Hétu et Gray, 1985). L'essentiel du bassin versant de la rivière de l'Anse Pleureuse se situe dans le plateau gaspésien, avec une limite altitudinale de 673 mètres au droit des limites du bassin versant. Encaissée dans ce plateau, la vallée offre des versants d'une dénivellation de 350 à 400 m. La structure géologique est formée de roches sédimentaires cambro-ordoviciennes (William, 1995 dans (Caron-Fournier, 2009) appartenant à la formation de Cloridorme (Hétu et Gray, 2000). On y retrouve des schistes argileux, des calcaires gréseux, des grès et porphyres minéralisés de la région de Murdochville (Enos, 1969; Sacks *et al.*, 2004 dans Caron-Fournier, 2009). Très friables, ces roches, vulnérables aux processus de météorisation, fournissent une grande quantité de sédiments dans l'ensemble du système hydrosédimentaire (Caron-Fournier, 2009).

La vallée en auge de la rivière de l'Anse Pleureuse (figure 2.2) est le résultat d'une succession d'étapes d'élargissement, de reprofilage et de surcreusement d'un ancien fjord par les langues glaciaires durant la dernière glaciation (Hétu et Gray 1985, 2000; Vigneault, 2011). En amont, les vallées des tributaires de la rivière sont des cols glaciaires de tête de vallée (Hétu et Gray, 1985), donnant sur les tributaires des bassins versants s'écoulant de l'autre côté de la ligne de partage des eaux. Alors que la mer de Goldthwait avait déjà envahi la vallée en 12 793 CAL BP¹ jusqu'à un niveau de 55 m, une dernière avancée d'une langue glaciaire est observée jusqu'au Dryas récent (11 390 -10 568 CAL BP) (Hétu et Gray, 2000). Le lac de l'Anse Pleureuse est ainsi un témoin majeur de l'action de surcreusement glaciaire de fond de vallée (Hétu et Gray, 1985).

¹ Les dates ont été calibrées avec l'outil CALIB (Marine09) en considérant un effet réservoir local de 210 ± 50 BP.

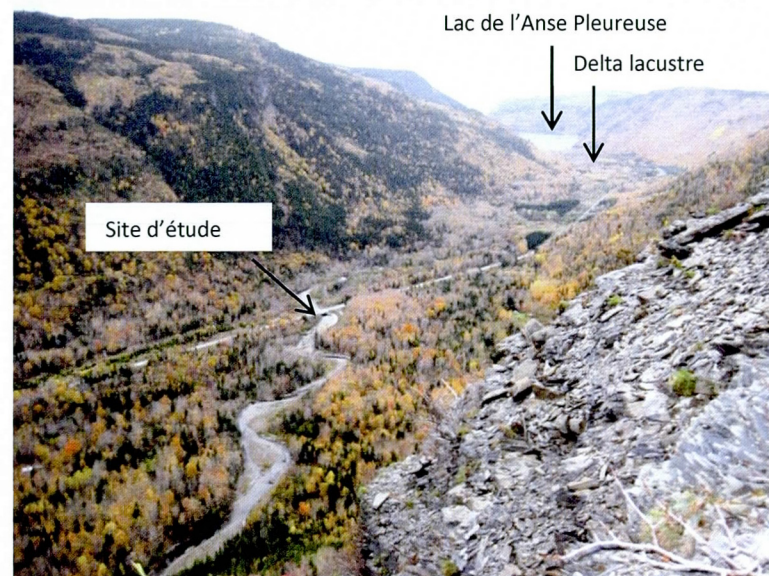


Figure 2.2 : Vue vers l'aval de la vallée en auge, aspect divagant de la rivière de l'Anse Pleureuse et localisation du lac et du delta lacustre.

L'avancée glaciaire a donné lieu à l'édification d'un delta de contact glaciaire à l'aval du lac alors que le fond plat de la vallée, en amont du lac, résulte d'une sédimentation dans la mer de Goldthwait (10 568 CAL BP) et d'une accumulation d'une nappe alluviale vers 10 164 CAL BP (Hétu et Gray, 2000; Vigneault, 2011) (figure 2.2). La dernière étape de la déglaciation a donc laissé des sédiments fluvio-glaciaires dans le fond de la vallée, organisés alors en plaine d'épandage. La section juste en amont du lac constituait, après la déglaciation, un delta lacustre (Hétu et Gray, 2000). Outre ces dépôts de fond de vallée, les langues glaciaires ont également formé des terrasses de kame dont trois lambeaux demeurent aujourd'hui (figure 2.3). La morphologie élargie et plate de la vallée, comblée de sédiments alluviaux, prédispose ainsi la rivière à une mobilité à travers ces sédiments.

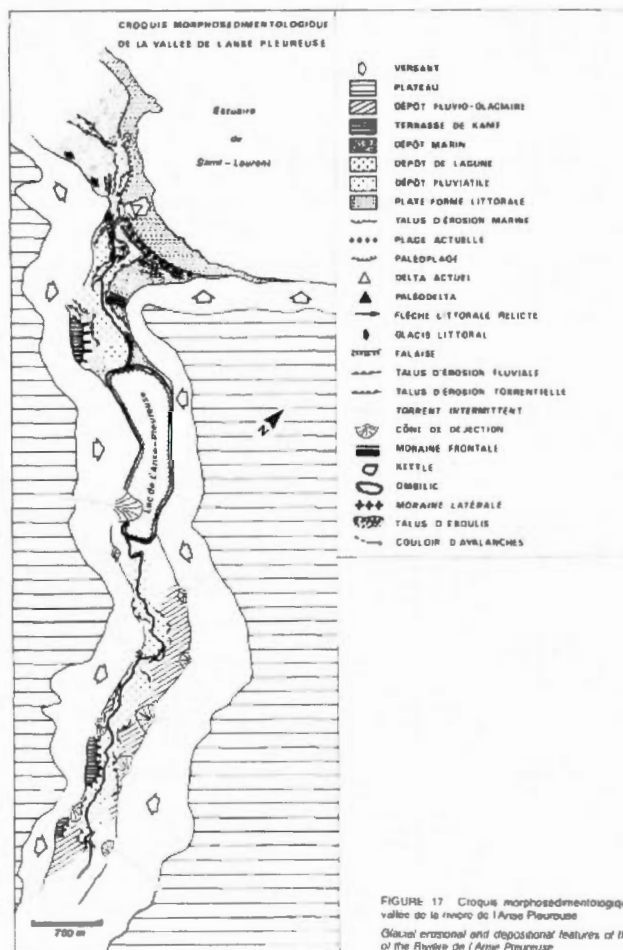


FIGURE 17. Croquis morphosédimentologique de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse
Glacial erosion and depositional features of the valley of the Rivière de l'Anse Pleureuse

Figure 2.3 : Croquis morphosédimentologique de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse (Source : Héty et Gray, 1985).

Les versants de la vallée de la rivière de l'Anse Pleureuse possèdent de fortes pentes en raison du dénivelé abrupt de près de 500 m entre le plateau et la vallée. Ce type de relief montagneux et abrupt présent sur l'ensemble du bassin versant prédispose à une réponse hydrologique rapide (Buffin-Bélanger, 2008). Les versants abrupts dominant la vallée offrent également une forte connectivité entre le cours d'eau et les colluvions issus de processus d'altération et de transformations de ces versants. Des cônes alluviaux et des talus d'éboulis se situent dans la trajectoire de la rivière de l'Anse Pleureuse, en plus de terrasses de kame en amont du secteur à l'étude. Ces éléments constituent, avec les tributaires, les principales sources de sédiments au cours d'eau. On retrouve plusieurs de ces sources sédimentaires

sur le tracé de la rivière (figure 2.4 (A)). La rivière étant divagante, la migration latérale de la rivière dans ses propres dépôts génère également des apports de sédiments significatifs à même ces alluvions (figure 2.4 (B)).

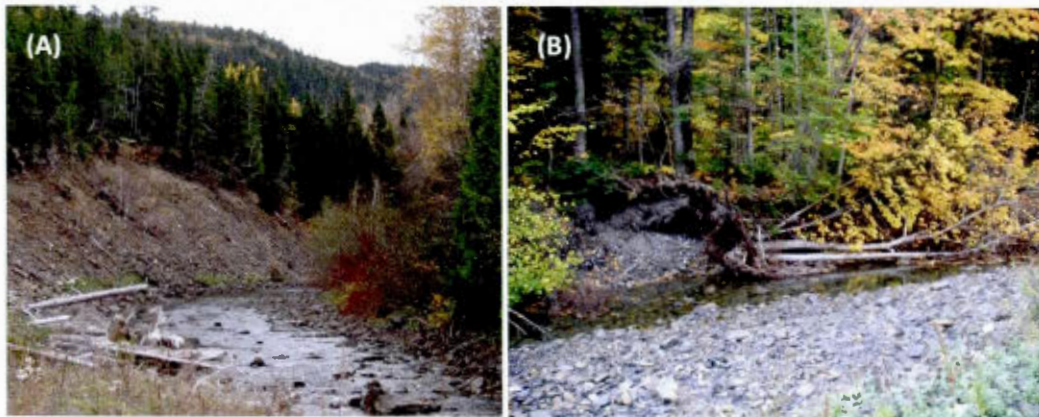


Figure 2.4 : Sources sédimentaires : érosion latérale dans un talus d'éboulis produisant un apport direct de colluvions de versants (A); érosion latérale dans la plaine alluviale produisant un apport direct d'alluvions récentes(B).

De plus, l'apport sédimentaire des torrents à la rivière peut être non négligeable, particulièrement lorsque les précipitations sont supérieures à 60 mm, seuil évalué par (Caron-Fournier, 2009) pour le déclenchement des écoulements hyperconcentrés dans cette vallée. Caron-Fournier (2009) mentionne également que ce sont les débris ligneux dans les torrents qui contribuent à la formation d'écoulements hyperconcentrés en formant des réserves sédimentaires, libérées lors d'évènements hydrologiques importants. Ce seuil de précipitations peut également générer de la torrencialité le long de la route dans le secteur du « *coteyage* », comme en témoigne l'évènement pluviométrique de 2002 (figure 2.5), qui a affecté les infrastructures du MTQ (*verbatim*, Gasse, 2012). Ces aléas hydrosédimentaires, en amont du site d'étude, peuvent influencer le régime sédimentaire du cours d'eau par un apport substantiel en sédiments.



Figure 2.5 : Évènements pluviométriques de 2002 ayant modifié la charge en sédiments dans la rivière de l'Anse Pleureuse, secteur du « coteyage » (A) (à 22 km de l'embouchure), secteur de rupture de pente (B) (à 12 km de l'embouchure) (Source : Gasse, 2012).

La rivière de l'Anse Pleureuse affiche un profil longitudinal à concave. La portion amont présente des pentes fortement prononcées (figure 2.6), avec une rupture de pente, entre la section de versant (3,6 %) et la section de plaine (0,3 %), située en amont du site à l'étude. À l'aval du site à l'étude, le profil expose une pente plus douce jusqu'au lac de l'Anse Pleureuse.

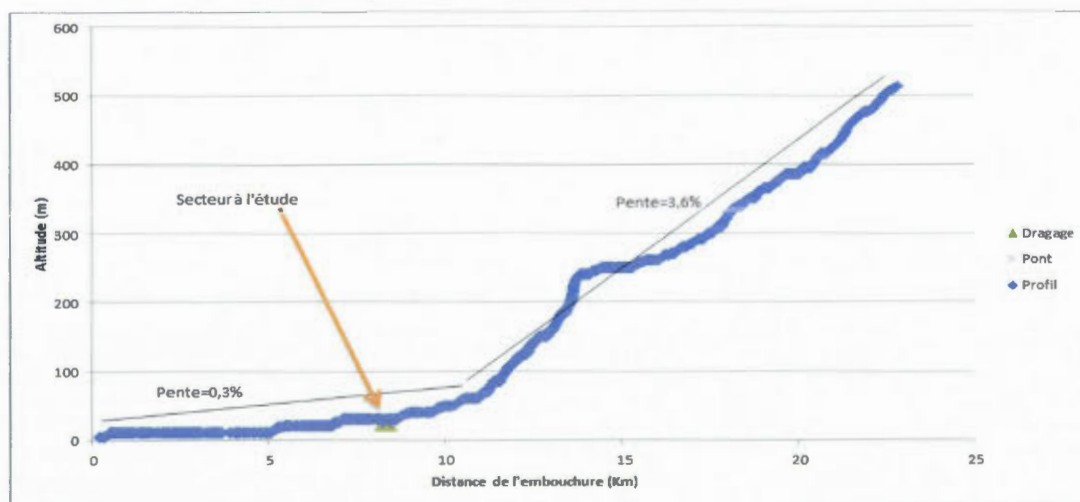


Figure 2.6 : Localisation du secteur à d'étude dans le profil longitudinal de la rivière de l'Anse Pleureuse.

Le style fluvial dominant est divagant, en particulier dans le secteur à l'étude (figure 2.2). Rappelons que le style fluvial divagant exprime une zone à faible dénivellée, où la sédimentation est importante et l'avulsion des chenaux régulière en réponse à l'exhaussement de leur lit (Desloges, 1989; Church, 2009). À l'aval du site à l'étude, la rivière se divise en plusieurs chenaux et occupe une plus grande portion de la vallée, jusqu'au lac de l'Anse Pleureuse. Cette morphologie fluviale s'explique par l'héritage fluvio-glaciaire, d'ailleurs souligné par la pente plus douce à cet endroit. Cette section fluviale, en amont du lac, a subi de nombreuses modifications géomorphologiques dans les dernières décennies. En effet, le tracé en plan du chenal principal, qui terminait sa course à l'ouest de la vallée jusqu'en 1992, a subi une avulsion entre 1992 et 2001, détournant l'écoulement en plusieurs chenaux jusque dans le fossé de la route à l'est de la vallée (Bourdon, 2008). La présence d'un pont privé, ayant retenu des sédiments en amont, puis sa rupture après 1992, ont pu exacerber le processus d'aggradation dans ce secteur (Bourdon, 2008). Cette dynamique morphologique à l'aval du site d'étude souligne l'instabilité du cours d'eau en lien avec des fluctuations du régime sédimentaire et donne un éclairage sur l'historique hydrosédimentaire potentiel du site d'étude.

En amont du pont P-02775, la rivière de l'Anse Pleureuse draine un bassin versant de $81,0 \text{ km}^2$ (Poirier et Niquet, 1992). Le régime hydrologique de la rivière est pluvionival et le débit de crue 0-2 ans peut atteindre $25,6 \text{ m}^3/\text{s}$ selon les estimations statistiques de Poirier et Niquet (1992), réalisées à partir de la station 21702. Mentionnons que cette station n'est pas référencée au Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, 2012), il est possible qu'il s'agisse d'une erreur de numérotation considérant que la station la plus proche est celle de la rivière Madeleine, situé dans la même région, qui porte le numéro 21802 et n'est plus opérée depuis 1985. Dans la région, quatre autres stations hydrométriques sous la responsabilité du CEHQ sont encore actives. Ces stations sont plus éloignées que celle de la rivière Madeleine, mais toutes concernent des rivières prenant leur source dans les monts McGerrigle et Chics-Chocs. Ces cours d'eau sont tous caractérisés par des temps de réponse hydrologique courts. En effet, Simard (2012) observe pour une rivière proximale du plateau

gaspésien, la rivière à Pierre, des temps de réponse oscillant entre 6 et 10 heures, selon l'intensité des précipitations et le moment dans l'année où elles surviennent. Il souligne également que la vitesse de propagation des ondes de crue se situe en moyenne autour de 5 km/h avec des valeurs allant jusqu'à 9 km/h.

Les données concernant les événements pluviométriques extrêmes ont été tirées du mémoire de maîtrise de Caron-Fournier (2009). Elles sont issues d'un traitement statistique des données d'Environnement Canada (1954-1995) et d'entrevues (réalisées entre 1995 et 2004).

2.2 Méthodologie

La section de la méthodologie porte sur les techniques, les instruments et les logiciels utilisés pour atteindre les objectifs du projet de recherche. Cette section est divisée en deux sous-sections traitant des deux types de travaux réalisés. Les analyses historiques sont tout d'abord présentées puis les travaux de terrain et de traitement de données sont décrits en détail.

2.2.1 Dynamique fluviale historique

Ce premier point de la méthodologie comprend les analyses portant sur des éléments historiques. On y traite de la trajectoire morphologique, de la trajectoire hydrologique et enfin, des archives d'événements.

2.2.1.1 Trajectoire morphologique

La trajectoire morphologique du cours d'eau comprend l'analyse de son comportement dans le temps. Cette analyse, en quantifiant et qualifiant l'évolution des formes du lit, amène une compréhension du comportement historique du cours d'eau dont la morphologie est l'expression. Les relevés quantitatifs des formes du lit comprennent la position des rives et la largeur du cours d'eau alors que les observations qualitatives comprennent l'évolution des bancs et le méandrement.

Pour réaliser ce volet, une analyse stéréoscopique de l'ensemble du tronçon (5 km) a été réalisée à l'aide de photos aériennes historiques. Des photos aériennes, à une résolution de 1/15 000, sont disponibles à tous les dix ans en moyenne à partir de 1963 et nous avons utilisé toutes les années disponibles (tableau 2.1). Cependant, nous ne possédons pas d'informations concernant la date de la prise de photo dans l'année. Cette information aurait été utile pour connaître le niveau d'eau lors de la prise des photos.

Tableau 2.1 : Caractéristiques des photographies aériennes historiques utilisées.

Numéro	Année	Type	Échelle
Q63116-81	1963	noir et blanc	1/15 000
Q75338-89	1975	noir et blanc	1/15 000
Q86110-34	1986	infrarouge	1/15 000
Q92600-29	1992	infrarouge	1/15 000
Q01269-65	2000	noir et blanc	1/15 000
Q04132-72	2004	infrarouge	1/15 000

La zone d'étude a été extraite des images en les balayant. Les images ont été géoréférencées dans le système d'information géographique (SIG) ArcGIS, avec l'outil « *Georeferencing* ». La photo de 1963 a été géoréférencée à partir de points de contrôle issus de données de la base de données topographiques du Québec (BDTQ), tels que des bâtiments et des intersections routières. Ensuite, entre 6 et 8 points de contrôle ont été utilisées pour géoréférencer les autres images à partir de la première photo aérienne. Il s'agit là encore de coins de bâtiments, d'intersections routières, ainsi que des piliers du pont (P02275), de caps de roches et autres éléments naturels stables. Le processus de transformation des images dans l'application « *Georeferencing* » a été de premier ordre polynomial. La précision spatiale d'une image, en regard de la mesure de distance dans cette même photo, a été estimée bonne, puisque basée sur les données propres de la photo. Par ailleurs, l'exactitude de positionnement a été estimée plus faible. Ces estimations d'erreur ont amené à ne retenir quantitativement que les mesures de distance sur une même photo (interannuel) et non entre deux images (pluriannuel).

Un travail de numérisation des berges a été fait *via* l'application « *Éditeur* » du SIG pour toutes les années. La berge correspond à la limite arbustive. La largeur entre les deux berges a été mesurée en 12 transects, distants de 100 m, le long du cours d'eau. La largeur du lit comprend l'ensemble du lit actif, soit toutes les surfaces sans végétation arbustive. Les largeurs du lit ont été traitées dans le logiciel Excel afin d'évaluer les moyennes et l'écart-type par année et par transect. Un diagramme en boîte à moustaches a été produit pour représenter la variabilité de la largeur.

L'évolution du lit et des bancs a été observée qualitativement sur les photos aériennes et comparée entre les années. L'évolution du lit et des bancs comprend le changement de leurs positions, de largeur du lit et l'évolution de la végétation. Les secteurs plus dynamiques ont été identifiés et des figures présentant la superposition des positions du lit ont été produites pour illustrer les changements.

2.2.1.2 Trajectoire hydrologique

L'étude de la trajectoire hydrologique du cours d'eau comprend l'analyse des variations interannuelles et pluriannuelles des débits à partir d'une série chronologique des débits. Dans le cadre de ce mémoire, l'analyse se limite à la reconstitution d'une série chronologique des débits et à sa description. Les variations du régime hydrologique constituent un volet important pour la compréhension de la trajectoire morphologique puisqu'elles conditionnent la capacité et la compétence de l'écoulement à mobiliser des sédiments. La durée et l'intensité des événements de mobilité ont été déduites des données de la série chronologique des débits reconstitués. La pluviométrie a également été relevée puisque, d'une part, elle est en lien avec la réponse hydrologique et, d'autre part et surtout, elle conditionne les événements torrentiels. De plus, comme il n'y a pas de données de débit directement collectées dans la rivière de l'Anse Pleureuse, les données de pluviométrie relevées à la station de Murdochville permettront de valider la série chronologique des débits reconstituée.

La recherche sur des données de débits existantes a confirmé l'absence de données hydrologiques pour la rivière de l'Anse Pleureuse. Nous avons tenté d'en obtenir par l'installation d'une station hydrométrique sur le site à l'étude. Cependant, la station, qui était pourtant en retrait dans une anabranch, a été totalement ensevelie par les sédiments dès la première crue. Toutefois, nous avons relevé le débit à deux reprises et ces valeurs ont été utilisées pour la validation de l'approche de reconstitution des débits.

Puisque nous avons considéré l'importance de connaître la trajectoire hydrologique du cours d'eau, le traitement statistique de séries de données de débits d'autres rivières jaugées est devenu nécessaire dans le but de reconstituer la série chronologique des débits de la rivière de l'Anse Pleureuse. La rivière Madeleine, qui juxtapose à l'est la rivière de l'Anse Pleureuse a été ciblée comme rivière de référence. Étant données la fermeture de la station de cette rivière en 1996, une régression simple a été réalisée avec d'autres rivières jaugées qui coulent à partir du massif gaspésien pour cibler celle qui présente le plus de similitudes avec la rivière Madeleine afin de combler les années manquantes de 1996 à 2011 (tableau 2.2). La période 1980-1985 étant commune à toutes les rivières, elle a été retenue pour les tests statistiques.

Tableau 2.2 : Caractéristiques des stations des bassins versants des rivières jaugées.

Rivière	Numéro	Superficie du bassin versant	Distance du site d'étude	Orientation	Période d'exploitation	Statut
Madeleine	020802	1 200 km ²	21,3 km	nord-est	1953-1996	fermé
Cascapédia	011003	1 680 km ²	77,1 km	sud	1978-2012	actif
Dartmouth	020602	645 km ²	69,6 km	sud-est	1970-2012	actif
York	020404	659 km ²	66,3 km	est	1980-2012	actif
Saint-Anne	021407	774 km ²	67,3 km	nord	1973-2012	actif

Après avoir choisi les rivières dont les données allaient être utilisées pour reconstituer la série chronologique des débits, des traitements statistiques ont dû être réalisés. Selon Benyahya *et al.* (2009), la superficie du bassin versant, dans les régions de l'est du Canada, est la variable principale expliquant le débit. En appliquant des régressions (équation 2-1), Benyahya *et al.* (2009) évaluent que la superficie du bassin versant est corrélée avec le débit selon des coefficients de détermination variant, selon la récurrence, entre 0,92 et 0,87 pour les quantiles de crues (0-2 ans à 100 ans) et entre 0,83 et 0,90 pour les quantiles des étiages (0-2 ans à 0-50 ans).

Ainsi, avec cette prémisse que la superficie du bassin versant explique en forte proportion le débit, une relation proportionnelle de Q/A a été utilisée afin de reconstituer un débit de la rivière de l'Anse Pleureuse (*comm. pers.*, Assani, 2012) à partir des données de débit de la rivière Madeleine, pour les années 1953 à 1996 et de la rivière la plus corrélée avec la rivière Madeleine pour les années 1996 à 2011.

$$Q = aA^b$$

Équation 2-1: Relation entre le débit et l'aire du bassin versant d'une rivière (source : Benyahya, 2009).

où, Q est le débit (m^3/s) et A , la superficie du bassin versant (km^2)

Les événements pluviométriques extrêmes ont été tirés du mémoire de maîtrise de Caron-Fournier (2009). Ils proviennent d'un traitement statistique des données d'Environnement Canada (1954-1995) à la station de Murdochville (N 48 057,000' ; O 65 031,000') et d'entrevues réalisées auprès d'employés du MTQ de 1995 à 2004. Un seuil pluviométrique de 60 mm a été ciblé par Caron-Fournier (2009) pour le déclenchement dans les torrents, d'écoulements hyperconcentrés chargés en sédiments.

2.2.1.3 Archives des évènements

Les archives d'évènements constituent de précieuses sources d'information renseignant sur des situations hydrologiques, sédimentaires ou sur des aléas ayant affecté des organisations ou des individus. Ces informations, sous forme de témoignages, documents officiels ou documents photographiques, peuvent aider à mieux comprendre la dynamique fluviale historique, voire même, quantifier des paramètres relevés. Ces informations peuvent également renseigner sur la connaissance et l'intégration de la géomorphologie dans les processus de planification de travaux en rivières.

Des recherches d'informations archivées, concernant les évènements historiques ayant eu des incidences sur la charge en sédiments (rupture de route, construction de pont privé), de même que sur des interventions directes dans le chenal ou en périphérie de celui-ci ont été réalisées auprès du MTQ. Des documents officiels, tels que des demandes d'autorisation environnementales pour travaux, études, comptes rendus, ont été reçus du MTQ. Les autorisations environnementales pour des travaux de dragage en 2002 et 2009 ont été reçues du MDDEP. Des entrevues sur des évènements hydrologiques et des aléas fluviaux dans la vallée ont été réalisées auprès d'employés du MTQ, de même qu'auprès d'un propriétaire riverain. Des informations sur les aléas fluviaux, de même que des documents photographiques ont été reçus.

À la lecture des divers documents de planification et d'autorisation des travaux par les ministères impliqués, le processus de planification des travaux a été relevé. Les éléments portant sur la justification des travaux, sur la connaissance de l'état géomorphologique, sur la connaissance et la prise en compte du comportement hydrogéomorphologique ont été relevés et évalués.

2.2.2 Dynamique fluviale observée durant l'étude

Les travaux de terrain et le traitement des données récoltées sont présentés ici. Pour faciliter la lecture, cette sous-section a été divisée en quatre points, soit : la cartographie hydrogéomorphologique, la topométrie et modélisation surfacique, la granulométrie et le transport de sédiments. La figure 2.7 indique la localisation des travaux et des mesures, de même que les limites des zones mentionnées dans le texte : secteur d'étude, tronçon à l'étude, zone de dragage amont et aval du pont. La position des berges est celle de 2004 tirée de la photographie aérienne.

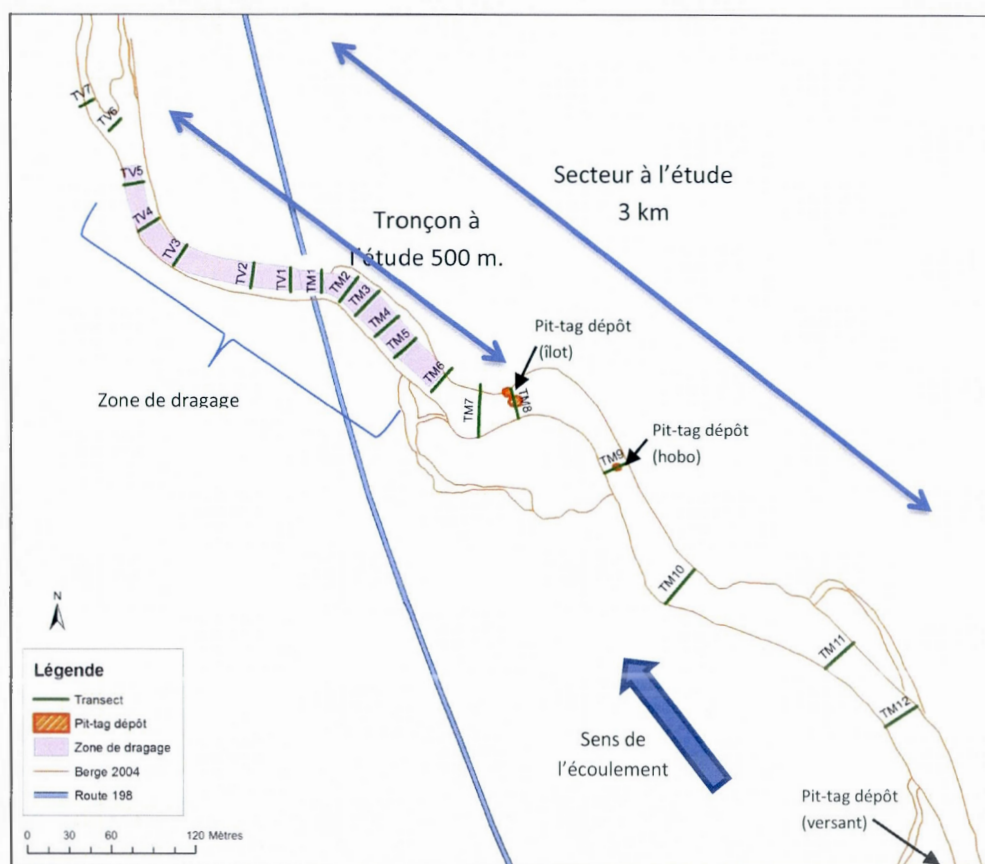


Figure 2.7 : Localisation des mesures dans le tronçon à l'étude.

Les campagnes de terrain se sont déroulées entre les mois de juillet 2009 et d'octobre 2011. Le tableau 2.3 suivant présente pour chaque date, le contexte et les objectifs, de même que les types de relevés qui ont été réalisés. Tous les types de relevés décrits dans cette section sont inclus dans ce tableau synthèse.

Tableau 2.3 : Date des campagnes de terrain.

Date	Contexte et objectifs	Description des relevés
7 juillet 2009	Reconnaissance du terrain avec des employés du MTQ	- Photographique
30-31 août 2009	Caractérisation avant les travaux de dragage	- Topographique - Granulométrique - Éléments géomorphologiques (GPS) - Photographique
20 septembre 2009	Caractérisation pendant les travaux de dragage	- Topographique - Photographique - Observations
4 novembre 2009	Caractérisation après les travaux de dragage	- Topographique - Photographique - Installation de traceurs (Pit-Tag) - Installation camera de suivi - Relevé hydrologique
10 avril 2010	Observations	- Photographique - Relevé hydrologique
3 mai 2010	Observations	- Photographique
8 juillet 2010	Caractérisation des ajustements après un an	- Levé topographique - Granulométrique - Photographique - Levé des traceurs
14 octobre 2011	Caractérisation des ajustements après deux ans	- Levé topographique - Granulométrique - Photographique - Levé des traceurs

2.2.2.1 Cartographie hydrogéomorphologique

En plus des éléments relevés par les photos aériennes au point 2.2.1.1, il convenait de relever sur le terrain divers éléments impliqués dans la dynamique fluviale. Ces éléments sont parfois moins perceptibles par photos aériennes ou encore ils peuvent être postérieurs aux photos aériennes dont la plus récente est de 2004. Les éléments naturels retenus pour la cartographie comprennent les bancs d'accumulation, les zones d'érosion, les sources

sédimentaires, les chenaux secondaires et les embâcles de bois mort alors que les éléments anthropiques comprennent le pont, les piliers de l'ancien pont privé et l'enrochement vétuste.

Les relevés des éléments fluviaux ont été réalisés avec un GPSmap 62cx de Garmin et avec des notes et supports photographiques. Les embâcles de bois mort ont été mesurés et caractérisés seulement en 2011 puisque cet élément n'avait pas été considéré en début de projet. Par contre, une cartographie des embâcles en 2009 a été retracée dans les documents du MTQ, de même que des photographies. Ces éléments ont permis d'évaluer sommairement les changements pour cet élément.

Tous les points de localisation relevés avec le GPS ont été intégrés dans un SIG ArcGIS. La marge d'erreur de l'instrument a été estimée lors des relevés par la moyenne des différences de positionnement entre une position relevée à dix reprises durant la journée de relevé. La marge d'erreur moyenne a été estimée pour le GPS à 1,6 m. Cette marge d'erreur a été évaluée suffisante pour le traitement de ce type de données dont le but n'est pas une quantification de la position, mais leur représentation graphique.

2.2.2.2 Topométrie et modélisation surfacique

C'est par la cartographie et les analyses de différences de volume de la surface que l'examen des ajustements morphologiques a pu être réalisé. Ce point comprend les travaux de levés topographiques par arpentage de même que le traitement par modélisation de modèle numérique d'élévation et de différences de volume. La méthode de levés et de traitement a été similaire pour les objectifs de caractérisation de la surface avant les travaux, après les travaux, de même que pour les deux suivis temporels réalisés en 2010 et 2011.

Tous les relevés topographiques du lit ont été réalisés à l'aide d'une station totale Leica TC700, excepté pour le levé de 2011 où une station totale robotisée a été utilisée, soit une station Trimble S3 (figure 2.8). La méthode de levé utilisée est celle de Keim *et al.* (1999).

Cette méthode préconise des levés de points aléatoires, mais avec une augmentation de la résolution dans les zones où il y a rupture de pente. En plus de ces levés aléatoires, d'une résolution spatiale d'environ 1 point par $1,5 \text{ m}^2$, des transects perpendiculaires au cours d'eau, situés à chaque 50 m, ont été relevés pour la représentation de sections transversales. Pour ces transects, la résolution est de 3 à 4 points par mètre.

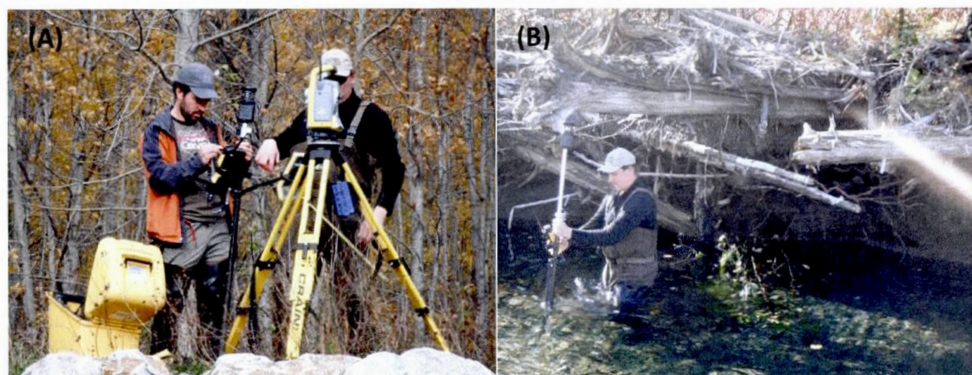


Figure 2.8 : Levé topographique du lit et des berges de la rivière de l'Anse Pleureuse avec la station totale robotisée. Station robotisée (A); Levé de la surface du lit avec le prisme (B).

Puisque le pont constitue un élément stable, des points de repère y ont été implantés et relevés au GPS. Ces points de repère sont le centre des boulons aux quatre extrémités du pont (figure 2.9). Un traitement de conversion a été appliqué aux données brutes des levés avec l'application « *Fusion* » sous MATLAB pour leur attribuer des coordonnées projetées relevées au GPS. L'application « *Fusion* » permet de modifier par triangulation les coordonnées X et Y des points à partir des coordonnées de deux points de références. Le système de référence MTM zone 5 a été utilisé pour l'ensemble des données.

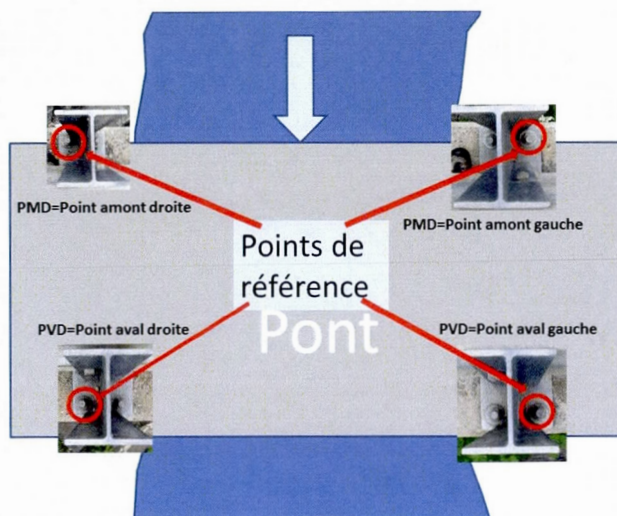


Figure 2.9 : Repère d'arpentage sur le pont P-02775.

Les données ont ensuite été intégrées dans le SIG sous ArcGIS et converties en réseau triangulé irrégulier (TIN) via l'application « *Création de TIN* » dans l'extension 3D Analyst. La quantification des volumes excavés, de même que des volumes mobilisés par érosion/accumulation, a été réalisée via l'outil « *érosion/dépôt* » dans l'extension 3D Analyst. La méthode utilisée est similaire à celle utilisée par Milan *et al.* (2007). Des modèles d'élévation ont été générés pour la période avant les travaux, la période immédiatement après les travaux, et un an et deux après les travaux.

2.2.2.3 Granulométrie et transport de sédiments

En draguant la rivière, le pavage recouvrant le lit du cours d'eau est détruit et un nouveau pavage prend place. Afin de quantifier et qualifier les ajustements granulométriques, des relevés granulométriques étaient nécessaires avant les travaux, puis un an et deux ans après. Puisque les sédiments se mobilisent durant des événements de mobilité, il devenait également intéressant de positionner des traceurs afin d'estimer le parcours des sédiments lors des ajustements.

Des relevés granulométriques ont été réalisés vis-à-vis des transects avant les travaux, de même que durant les deux années suivant les travaux. Ces relevés ont été effectués par

mesure des axes A et B des cailloux à chaque pas, selon la méthode en transect proposée par Wolman (1954) dans Kondolf *et al.* (2003). Le nombre de cailloux par transect a été de 200 la première année, puis, faute de temps suffisant, de 150 pour les deux autres années de suivi. Les données ont été intégrées dans un logiciel pour le traitement statistique, dont la mesure de la médiane (D50).

Des traceurs, de type transpondeurs passifs (« *Pit-Tag* »), ont été intégrés dans des cailloux de dimension moyenne récoltés de façon aléatoire en amont de la zone draguée, où le pavage n'avait pas été perturbé. La méthode s'est appuyée sur celle utilisée par Lamarre *et al.* (2005). La dimension (D50) des cailloux supportant les traceurs était similaire à celle de la moyenne de la zone à l'étude. En tout, 150 cailloux traceurs ont été déployés dans cinq endroits (tableau 2.4). Les trois premiers lieux concernent des chenaux en amont, près de la zone de dragage à 85 m en amont du pont. Les quatrième et cinquième groupes ont été positionnés respectivement à 175 m et 625 m en amont de la zone de dragage (figure 2.7). Tous les endroits où les groupes de cailloux ont été déposés correspondent à des seuils entre deux mouilles. Les cailloux ont simplement été déposés sur le fond du lit.

Tableau 2.4 : Distribution des traceurs sur le site à l'étude.

Lieu	Nombre	D50(mm)
Îlot droit	30	60
Îlot gauche	29	62
Amont îlot	29	64
Hobo	24	70
Versant	28	57
Total général	140	63

Des relevés de la position des traceurs ont été réalisés à chacune des deux années de suivi, intensivement dans la section draguée et plus légèrement sur quelques 300 m vers l'amont. La localisation des traceurs a été relevée avec la station totale alors que la position de ceux-ci avait été identifiée grâce à une antenne réceptrice. Le trajet parcouru a été défini et mesuré en cartographie, en reliant le point de départ et d'arrivée d'un traceur, en passant par le talweg. Pour les endroits à doubles chenaux, le chemin le plus court a été privilégié,

pour les quelques traceurs qui ont présenté cette problématique, mais la différence de distance entre les deux tracés demeure toutefois minime (4 m).

2.2.2.4 Transport sédimentaire et évènements de mobilité

Le bilan sédimentaire est nécessaire pour l'évaluation de la magnitude de la perturbation dans le système. Le bilan sédimentaire permet également de mieux cerner le régime sédimentaire du cours d'eau, lui-même en lien avec la trajectoire morphologique historique. Puisque l'évaluation du bilan sédimentaire historique est un exercice complexe qui dépasse les limites de cette étude, l'objectif poursuivi ici se limite à quantifier les taux de transport observés uniquement durant la période de suivi et à estimer les évènements hydrologiques responsables de ce transport. Dans un deuxième temps, l'ampleur de la perturbation liée au dragage de 2009, estimée en volume, est présentée face à d'autres perturbations hydrosédimentaires, ponctuelles et quantifiables, ayant affecté le système historiquement. Ces perturbations sont des évènements de nature anthropique (excavation) ou naturelle (apport torrentiel) qui dépassent le flux normal du régime sédimentaire.

Tel que mentionné par Rovira *et al.* (2005), la fosse de dragage constitue une grande trappe à sédiments dont le comblement annuel peut être considéré comme le taux annuel pour cette période. Cette méthode a été appliquée par Gob *et al.* (2005) pour tester des équations. La méthode consiste à présenter les différences de volume entre les années mesurées à l'aide des modèles d'élévation générés précédemment. Le détail de la technique de calcul de volume est présenté à la section 2.2.2.2. Mentionnons toutefois que cette technique comporte quelques limites. En effet, des sédiments peuvent avoir transité dans la zone sans s'être déposés. En raison du comblement progressif de la fosse draguée dès la première année d'ajustement, il est possible que seul le volume mesuré durant la première année de suivi puisse être interprété comme un taux de transport annuel.

Afin de déterminer le seuil hydrologique qui génère de la mobilité des sédiments, deux approches ont été utilisées. La première s'appuie sur les taux de transport de la première année, intégrés dans une équation de transport potentiel (Schoklitsch's, 1934 dans Gob *et*

al., 2005). La deuxième s'appuie sur l'équation de la puissance spécifique critique de Costa (1983, dans Petit, 2005), générée à partir du D50. Ce seuil défini, il est possible d'identifier, dans la série temporelle de débit, les événements hydrologiques responsables du transport ainsi que leur durée et leur intensité.

À l'aide du taux de transport estimé pour la première année d'ajustement, l'équation empirique de Schoklitsch's (1934) (équation 2-2) a été utilisée pour déterminer le débit spécifique critique.

$$gs = 2\,500S^{3/2}(q - q_{cr})$$

Équation 2-2 : Équation de transport de sédiment de Schoklitsch's (1934) (source : Gob *et al.*, 2005)

Où gs = taux de transport, S = pente, q = débit, q_{cr} = débit spécifique critique.

Cette équation a notamment été utilisée par Gob *et al.* (2005), avec un débit spécifique critique connu, et avait donné de bons résultats quant à sa capacité d'estimer le taux annuel issu d'un comblement de fosse de dragage. Notons que le taux de transport annuel, en kg/s, a été converti en m^3 avec la masse volumique de la roche de grès schisteux ($1\,m^3 = 1\,600\,kg$) (Wikipedia, 2012).

Le débit spécifique critique théorique a été obtenu à partir de la puissance spécifique critique, définie par l'équation 2-3 de Costa (1983 dans Petit, 2005), avec la prémisse que le seuil de mobilisation correspond à la mobilisation des grains de dimension moyenne (D50) (Parker, 1982 dans Powell, 1998). Ensuite, avec les valeurs de puissance spécifique critique, un débit spécifique critique pour le cours d'eau a été généré à partir de l'équation 2-4 de la puissance spécifique de Bagnold (1977, dans Petit, 2005) en isolant la variable débit spécifique critique.

$$\omega_0 = 0.030 D_i^{*6.9}$$

Équation 2-3 : Puissance spécifique critique (source : Costa 1983, dans Petit, 2005)

où ω_0 = puissance spécifique critique (Wm^{-2}), D_i = diamètre des grains mobilisés (mm).

$$\omega = \frac{(\rho g Q S)}{w} \quad \Rightarrow \quad \omega * w = (\rho g Q S) \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega w}{\rho g S} = Q$$

Équation 2-4 : Puissance spécifique et débit spécifique critique (source : Bagnold 1977, dans Petit, 2005)

où ω = puissance spécifique, ρ = densité (kg/m^3), g = accélération gravitationnelle (ms^{-2}), Q = débit (m^3/s), S = pente, W = largeur (m).

Concernant l'évènement de dragage de 2002, le volume excavé a été estimé à partir des prévisions de limites mentionnées dans l'autorisation environnementale correspondante, pour lequel un ajustement a été réalisé selon le rapport entre les prévisions de limites de 2009 et les volumes mesurés. Ce rapport a établi une surévaluation de 114 % dans le devis des travaux de 2009.

Concernant l'évènement torrentiel de 2002, une estimation de volume de sédiments intégrée au système, a été générée à partir d'une hauteur, d'une largeur et d'une longueur moyennes de tronçon routier, dont le remblai a été emporté par les écoulements torrentiels. Le même type d'estimation a été appliqué au secteur du ponceau dont le remblai a également été emporté. Nous sommes conscients que ces valeurs sont à considérer à titre indicatif en raison d'une marge d'erreur élevée et de l'intégration réelle de tous ces sédiments au système fluvial. Toutefois, ces données informent sur l'importance de ces évènements hors régime dans le flux moyen de sédiments.

CHAPITRE III

RÉSULTATS

Le chapitre III comprend l'ensemble des résultats générés dans le cadre de cette étude. Tout comme la méthodologie, ils sont structurés selon une thématique chronologique des éléments abordés. On distingue ainsi trois sections, en relation directe avec les trois objectifs du projet de recherche, soit la trajectoire hydrogéomorphologique, l'état géomorphologique et les travaux d'excavation et, enfin, les ajustements morphosédimentaires suite aux travaux d'excavation.

3.1 Trajectoire hydrogéomorphologique

La trajectoire hydrogéomorphologique comprend les résultats des analyses portant sur le régime hydrologique et sur le comportement morphologique du cours d'eau dans le temps. Cette première section est divisée en trois points, soit l'hydrologie et l'hydraulique fluviale, la dynamique du cours d'eau à l'échelle de la section et, enfin, la dynamique du cours d'eau à l'échelle du tronçon.

3.1.1 Hydrologie et hydraulique fluviale

Les données hydrométriques de la rivière Madeleine n'existant que pour la période de 1953 à 1996, il convenait de choisir une autre rivière comparable afin de compléter la série de données pour la période de 1997 à 2011. Les régressions linéaires simples ont donné des coefficients de détermination (R^2), en ordre croissant, de 0,83 pour la rivière Darmouth (station 20602), 0,84 pour la rivière Sainte-Anne (station 21407), 0,87 pour la rivière

Cascapédia (station 11003) et finalement 0,90 pour la rivière York (station 20404) avec une marge d'erreur de 5 % (figure 3.1). Avec le coefficient de détermination le plus élevé, la station de la rivière York (no 20404) a ainsi été retenue pour reconstituer la période 1997-2011 de la série temporelle de débit de la rivière de l'Anse Pleureuse à partir du débit spécifique, soit le débit par km^2 .

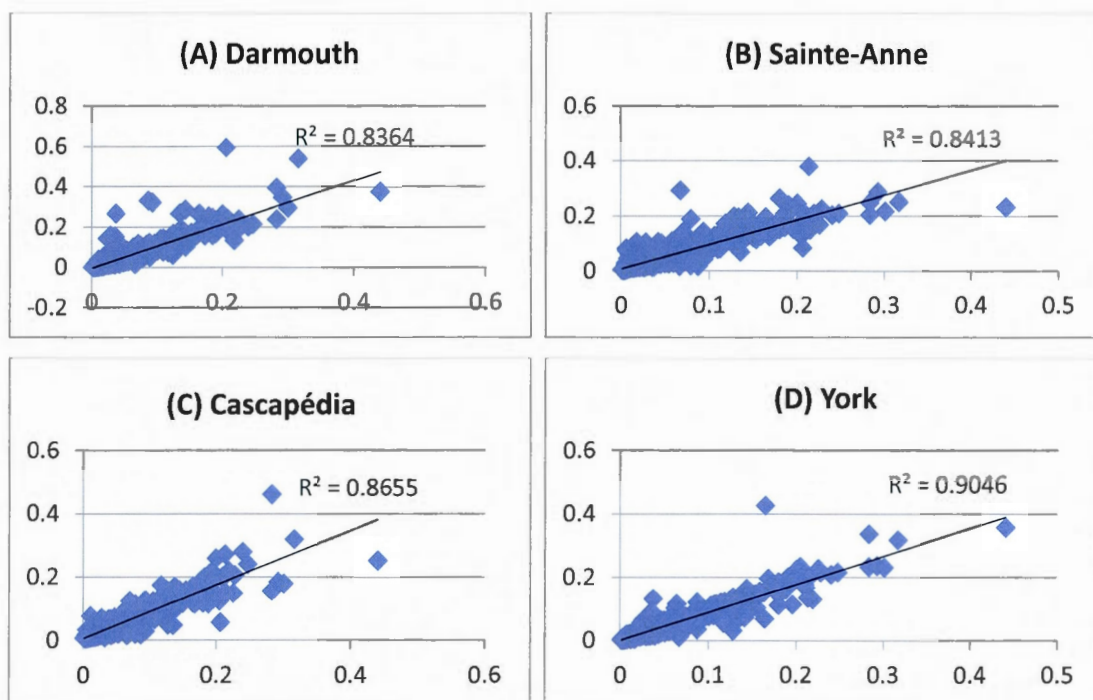


Figure 3.1 : Relations entre la série temporelle de débit spécifique de la rivière Madeleine avec les séries temporelles des débits spécifiques des rivières Darmouth (A), Sainte-Anne (B), Cascapédia (C) et York (D).

Une série chronologique des débits maximaux annuels historiques a été produite pour la rivière de l'Anse Pleureuse à partir des données de débits maximaux annuels des rivières Madeleine (1954-1996) et York (1997-2011) (figure 3.2). Les valeurs présentent une forte variabilité entre les années. La moyenne historique des débits maximaux annuels est de $19,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Rappelons que les valeurs élevées de débit sont particulièrement intéressantes puisqu'elles sont corolaires d'un potentiel élevé de transport sédimentaire.

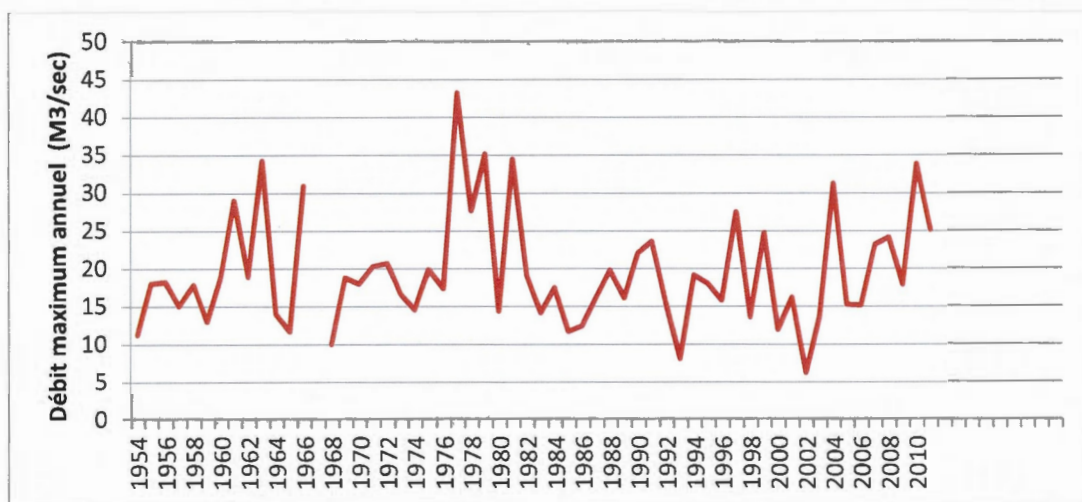


Figure 3.2 : Série chronologique des débits maximaux annuels de la rivière de l'Anse Pleureuse, reconstituée à partir des débits maximaux annuels de la rivière Madeleine (1954-1996) et de la rivière York (1997-2012).

Des événements de maximaux plus intenses s'observent pour les années 1961, 1963, 1966, 1977, 1979, 1981, 2004 et 2010. Les huit événements identifiés sont supérieurs d'au moins une fois et demie la moyenne des maximums annuels. En outre, les quatre événements maximaux de 1963, 1977, 1978 et 1981 se démarquent par une proportion de plus du double pour 1977 et de près du double pour les trois autres. Notons que la valeur maximale atteinte en 2010 ($33,9 \text{ m}^3/\text{s}$) se rapproche des valeurs les plus extrêmes des quatre autres événements enregistrés historiquement.

Durant les deux années de suivi de l'étude, soit 2009-2010 et 2010-2011, le régime hydrologique a été caractérisé par deux crues de printemps d'un maximum de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2010 et de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2011 (figure 3.3). La période de crue de 2010 a été précoce (début avril) contrairement à l'année 2011 où elle a été plus tardive (début mai). La période de crue de 2010 s'est étalée sur environ un mois et demi et celle de 2011 sur un mois. Des niveaux d'eau élevés ont été observés à l'automne 2010, en octobre, novembre et décembre. L'événement du mois de décembre fut particulièrement intense avec un débit de pointe de $34 \text{ m}^3/\text{s}$, dépassant le maximum de la période de crue. Cet événement correspond à la

tempête Irène. En 2011, deux niveaux élevés ont été observés à l'automne, soit un au mois d'août et un en septembre.

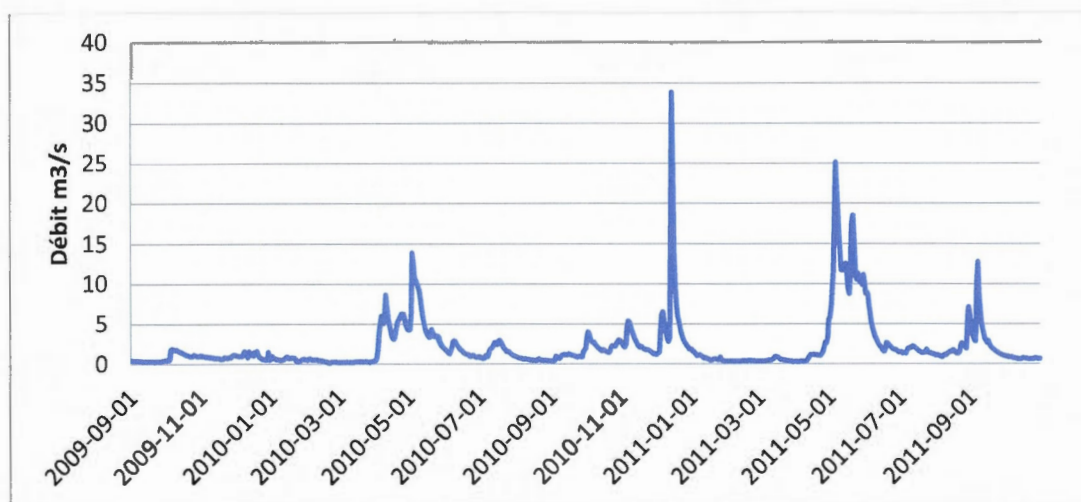


Figure 3.3 : Série temporelle de débit de la rivière de l'Anse Pleureuse (2009-2011) reconstituée à partir des données de la station sur la rivière York.

Selon un responsable de l'entretien routier du MTQ (dans Caron-Fournier, 2009), les événements de 1980, de 1991 et de 2002 sont les événements torrentiels historiques les plus intenses (

tableau 3.1). Caron-Fournier (2009) précise qu'ils ont atteint la base d'un cône, dans la vallée, et ont provoqué une forte sédimentation. Dans le cas de l'événement de 2002, des dépôts de l'ordre de 1 m ont été observés sur la route (Caron-Fournier, 2009).

Tableau 3.1 : Évènements pluviométriques supérieurs à 59 mm de pluie, mesurés à la station de Murdochville, ayant entraîné des écoulements hyper-concentrés dans les torrents du bassin versant de la rivière de l'Anse Pleureuse (modifié de Caron-Fournier, 2009)

Date	Précipitations (mm)	Commentaires
1954-09-11	113,8	Pas d'information
1959-10-25	67,8	Pas d'information
1969-10-25	77,5	Pas d'information
1980-07-06	66,0	Évènement documenté par le MTQ
1980-08-09	59,4	Pas d'information
1991-06-13	73,0	Évènement documenté par le MTQ
2002-08-07	76,0	Évènement documenté par le MTQ

3.1.2 Dynamique du cours d'eau à l'échelle de la section

La rivière de l'Anse Pleureuse présente un comportement historique dynamique qui s'exprime par la modification continue de son tracé en plan. En effet, dans l'ensemble de la zone à l'étude, la divagation historique de la rivière de l'Anse Pleureuse est illustrée à la figure 3.4. Les positions des transects de largeur qui ont été mesurés à tous les 100m sont représentées par les points verts.

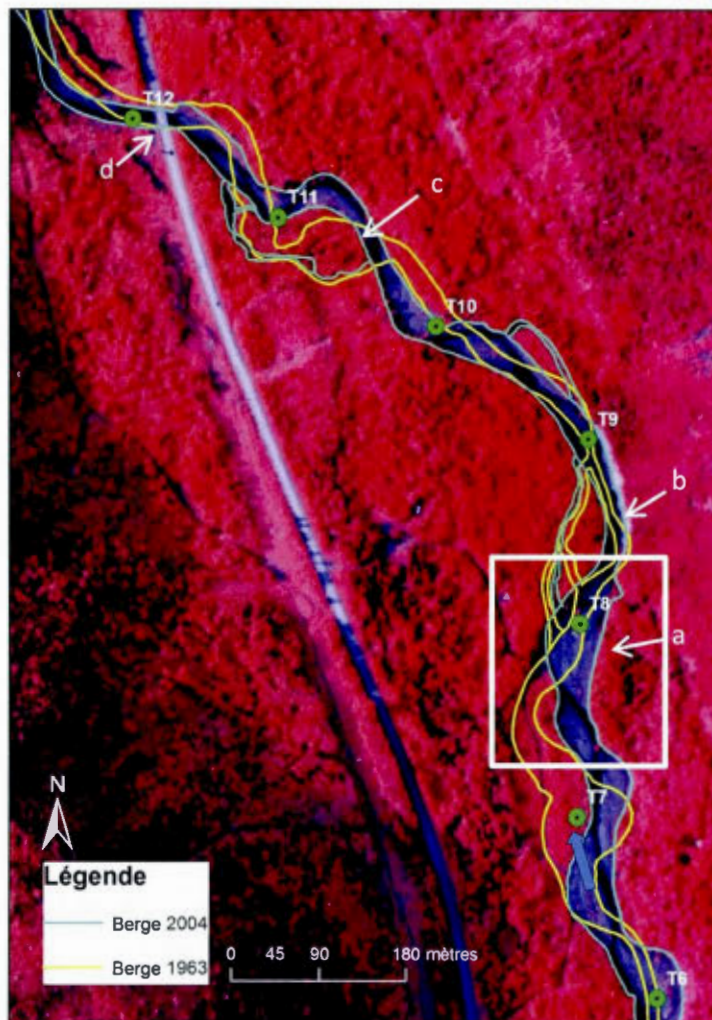


Figure 3.4 : Évolution historique du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse dans la section à l'étude, tracés de 1963 et 2004 sur photo aérienne infrarouge de 2004. Position des transects de mesure de largeur. Berge libres et tronçons dynamiques (a) et (c); berges ancrées et tronçons statiques (b) et (d).

De l'amont vers l'aval, on observe que certains tronçons (b, d) sont relativement statiques dans le temps, alors que la divagation est plus forte au droit d'autres tronçons (a, c). Les deux tronçons plus statiques ont comme particularité d'avoir des berges ancrées. Sur le tronçon (b), la berge en rive droite est ancrée par des colluvions de versant d'une hauteur

de 10 m. Le tronçon (d) correspond au pont P-02275, où les deux berges sont ancrées par les piliers du pont.

Il est intéressant d'observer que la divagation, notamment la variabilité dans la largeur et la position du tracé, entre 1963 et 2004, est plus forte dans les tronçons en amont de ceux qui sont statiques. Cette observation a été quantifiée par des mesures de largeur du cours d'eau (figure 3.5). En effet, les transects T7 et T8, de même que le transect T11, tous situés en amont des secteurs ancrés, présentent les plus fortes variations de largeur.

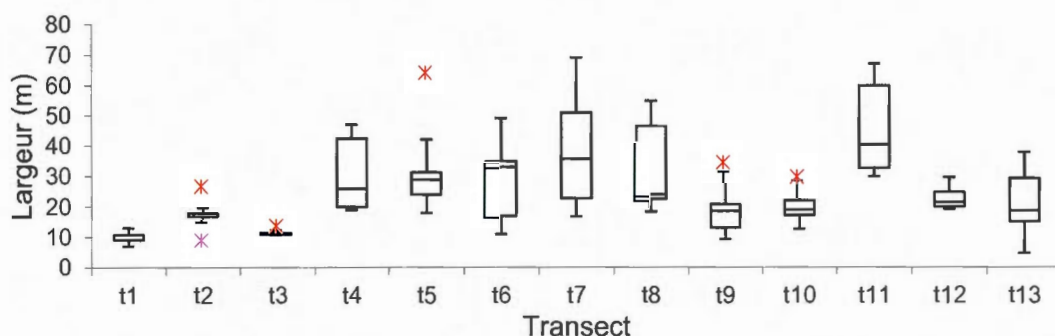


Figure 3.5 : Variabilité spatiale des largeurs du cours d'eau au droit de chacun des transects le long du corridor fluvial, pour les années 1963, 1975, 1986, 1992, 2000 et 2004.

Les transects T7-T8 correspondent au tronçon (a), fortement variable dans sa largeur avec un écart type de 20,3 et de 16,6 m respectivement pour les deux transects. Le transect T11 correspond au tronçon (c) avec un écart-type de 16 m, alors que les tronçons plus statiques (b, d) correspondent approximativement aux transects T9 et T12 avec une variabilité de 9,1 et 4,1 m.

Le transect 12 se situe dans la zone de dragage, à l'aval du pont P-02775 alors que les transects 11 et 13 se situent aux extrémités de celle-ci. La largeur moyenne historique de ces trois transects est de 29,9 m et l'écart type moyen est de 11,6 m. Au minimum, le tronçon 12 présente une largeur moyenne de 22,8 m avec un écart type de 4,1 m.

En plus de la variabilité spatiale de la largeur (figure 3.5), on observe également une variabilité temporelle (figure 3.6). Avec un écart type de 10,7 m, on observe que les années 1986 et 1992 sont les années dont les moyennes de largeur sont les plus élevées avec des valeurs de 36,3 et de 33 m. Les années 1963 et 2000 présentent les plus faibles valeurs de largeur avec 19,6 et 20,9 m.

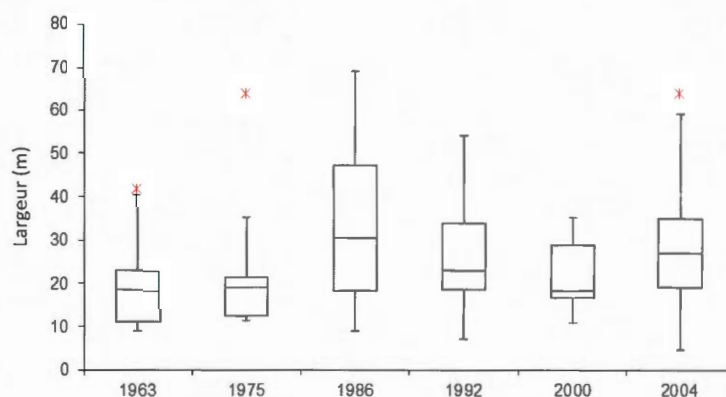


Figure 3.6 : Variabilité de la largeur du corridor fluvial pour chacune des années relevées.

Il est également intéressant d'observer que le transect présentant la plus forte variabilité de largeur est le T7. C'est à cet endroit qu'un pont privé avait été construit puis emporté par l'écoulement. La variabilité historique de la largeur du transect 7 est illustrée avec la série de photos aériennes à la figure 3.7.

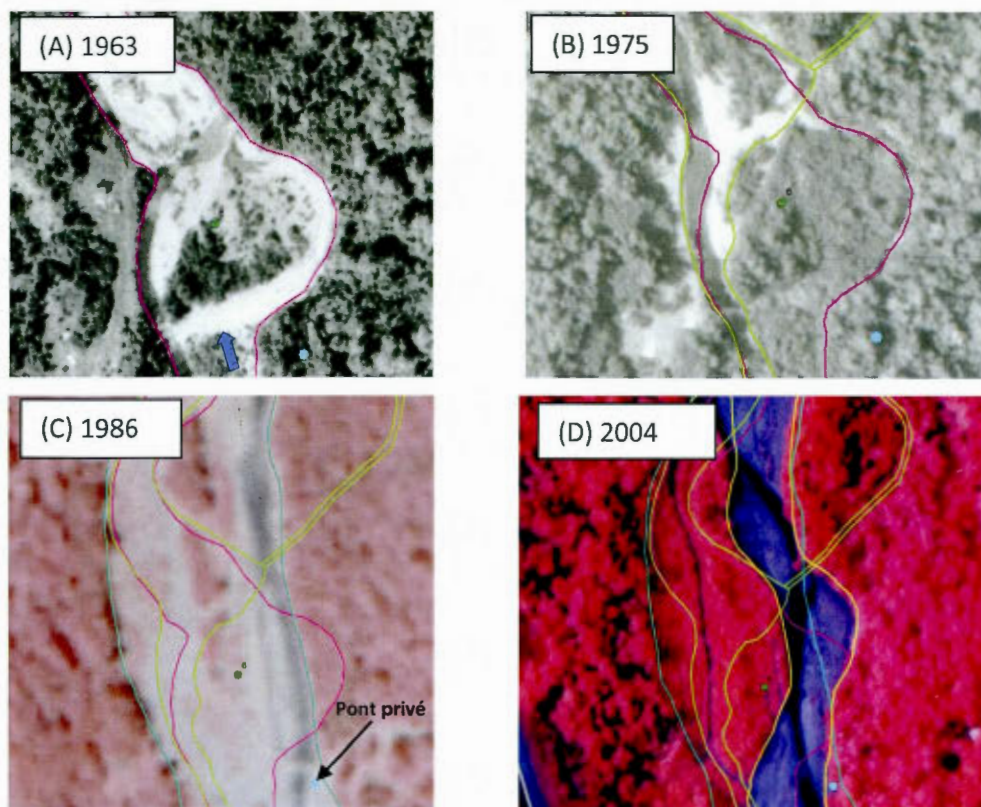


Figure 3.7 : Variabilité historique de la largeur du transect 7 (tronçon a) et localisation d'un pont privé en 1986 : 1963 (A); 1975 (B); 1986 (C); 2004 (D). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et jaune 2004.

En 1963, le cours d'eau est très large à cet endroit, son lit s'étale sur 90 m. En 1975, la largeur du lit diminue fortement à 19,8 m. La position du chenal principal est en rive gauche en 1963 et 1975 alors qu'elle bascule en rive droite en 1986, avec une largeur du lit mineur de 90 m. À cette date, le pont privé est visible sur la photo aérienne. En 2004, la largeur diminue à 29 m alors que le talweg est sinueux et passe de la rive droite à la rive gauche.

3.1.3 Dynamique du cours d'eau à l'échelle du tronçon

Dans la section en amont du pont de la route 198, la position du chenal présente une forte variation alors que la largeur du cours d'eau demeure constante (figure 3.8). Le méandre directement en amont du pont (a) a subi une diminution de son amplitude entre 1963 et 2004. Cette diminution a modifié l'angle de l'écoulement à l'entrée du pont. Alors que

l'écoulement était parallèle aux piliers du pont en 1986, avec une distance entre le pont et la courbe du méandre de 55 m, l'angle a commencé à changer pour devenir plus prononcé et, en 2004, la courbe du méandre s'effectue à une dizaine de mètres du pont. Il s'agit d'une légère translation vers l'aval du méandre. Dans l'ensemble de la zone draguée, la largeur moyenne historique est de 25 m.

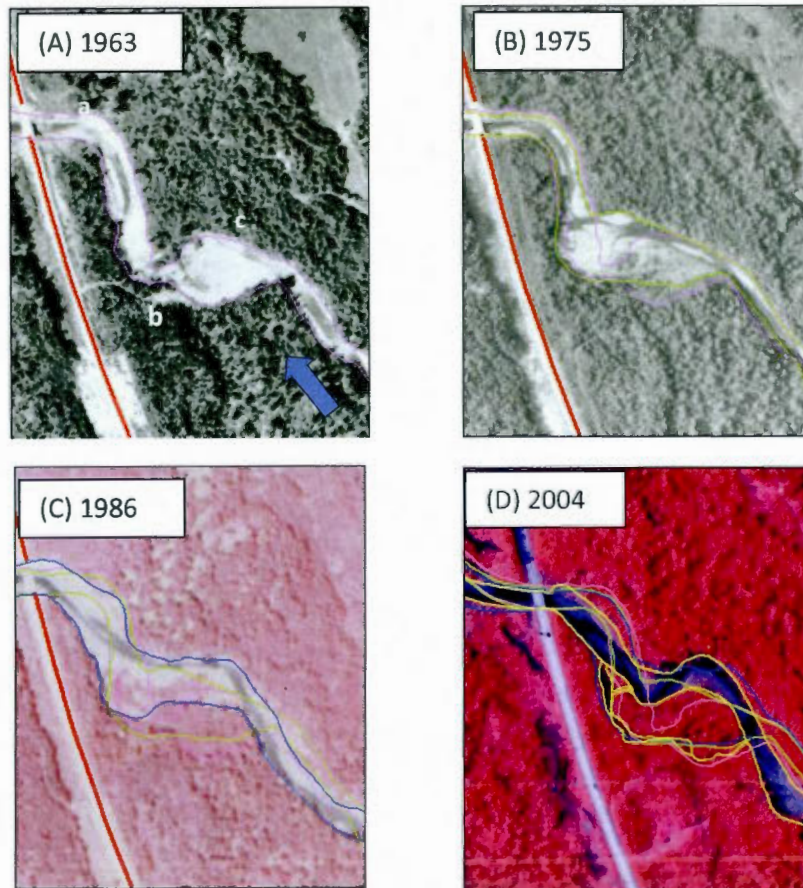


Figure 3.8 : Positions historiques du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse, section en amont du pont P-02775 : 1963 (A); 1975 (B); 1986 (C); 2004 (D). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et jaune 2004.

Les deux méandres situés un peu plus en amont (b-c) ont subi eux de profondes transformations entre 1963 et 2004. Le patron de l'écoulement entre ces années est complexe et l'évolution de la trajectoire, difficilement qualifiable. Néanmoins, il en ressort que leur position fut fortement variable dans le temps. Une grande proportion du lit de

1963 n'est plus du tout active en 2004 puisqu'elle est complètement végétalisée. En ne comparant que ces deux années, on peut apercevoir une certaine translation vers l'aval de ce méandre.

Dans la section aval du pont, la trajectoire historique du tracé en plan du cours d'eau est unidirectionnelle avec une migration latérale du méandre en aval du pont (a) de près de 26 m dans le plus fort de la migration (figure 3.9). Notons que la position du chenal en 2004 dans cette partie centrale du méandre est complètement décalée par rapport à celle du chenal de 1963.

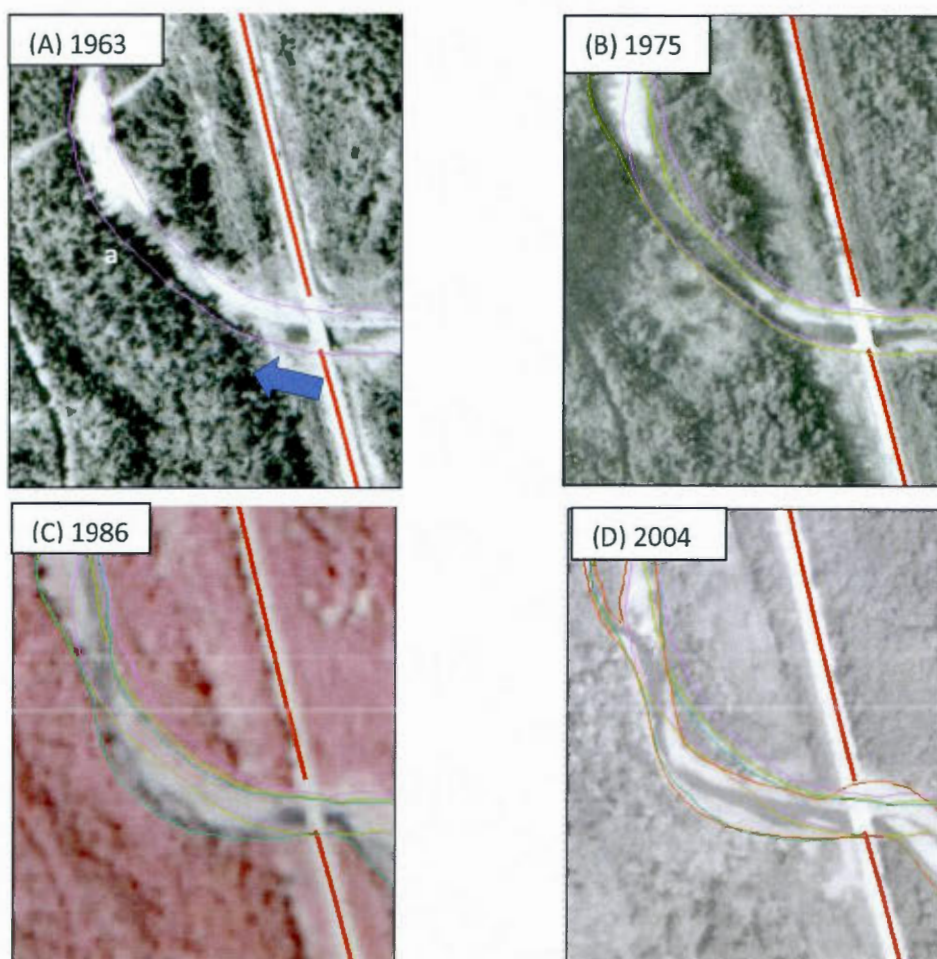


Figure 3.9 : Positions historiques du tracé en plan de la rivière de l'Anse Pleureuse, section en aval du pont P-02775, photos aériennes de 1963 (A), 1975 (B), 1986 (C) et 2004 (D). Tracé des berges du cours d'eau : mauve 1963; vert 1975; bleu 1986 et rouge 2004.

Les analyses stéréoscopiques ont également mis en lumière la présence d'un enrochement en 1963 en amont du pont, avec chemin d'accès en rive gauche (figure 3.10). La présence de cet enrochement a été validée sur le terrain alors que l'enrochement se situe aujourd'hui dans la forêt. Une anabranch est encore active devant les vestiges de cet enrochement. Elle rejoint la rivière de l'Anse Pleureuse vis-à-vis de la limite amont de la zone de dragage.

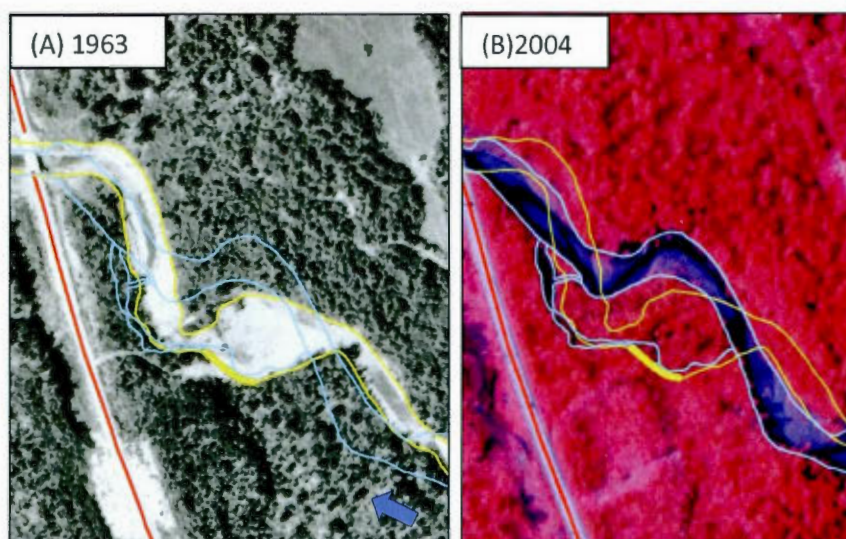


Figure 3.10 : Localisation d'un enrochement en 1963 (A), aujourd'hui abandonné par la rivière (B).

3.2 État géomorphologique et travaux d'excavation

Ce deuxième point s'intéresse à l'état géomorphologique juste avant les travaux et détaille également les travaux effectués. On aborde ainsi la situation géomorphologique, la granulométrie des sédiments du lit et enfin la nature et l'importance des travaux d'excavation.

3.2.1 État géomorphologique pré-extraction

La figure 3.11 présente l'état géomorphologique du tronçon à l'étude, juste avant le début des travaux de l'automne 2009. Mentionnons toutefois que la photo aérienne date de 2004, expliquant des différences entre les formes illustrée et celle relevés.

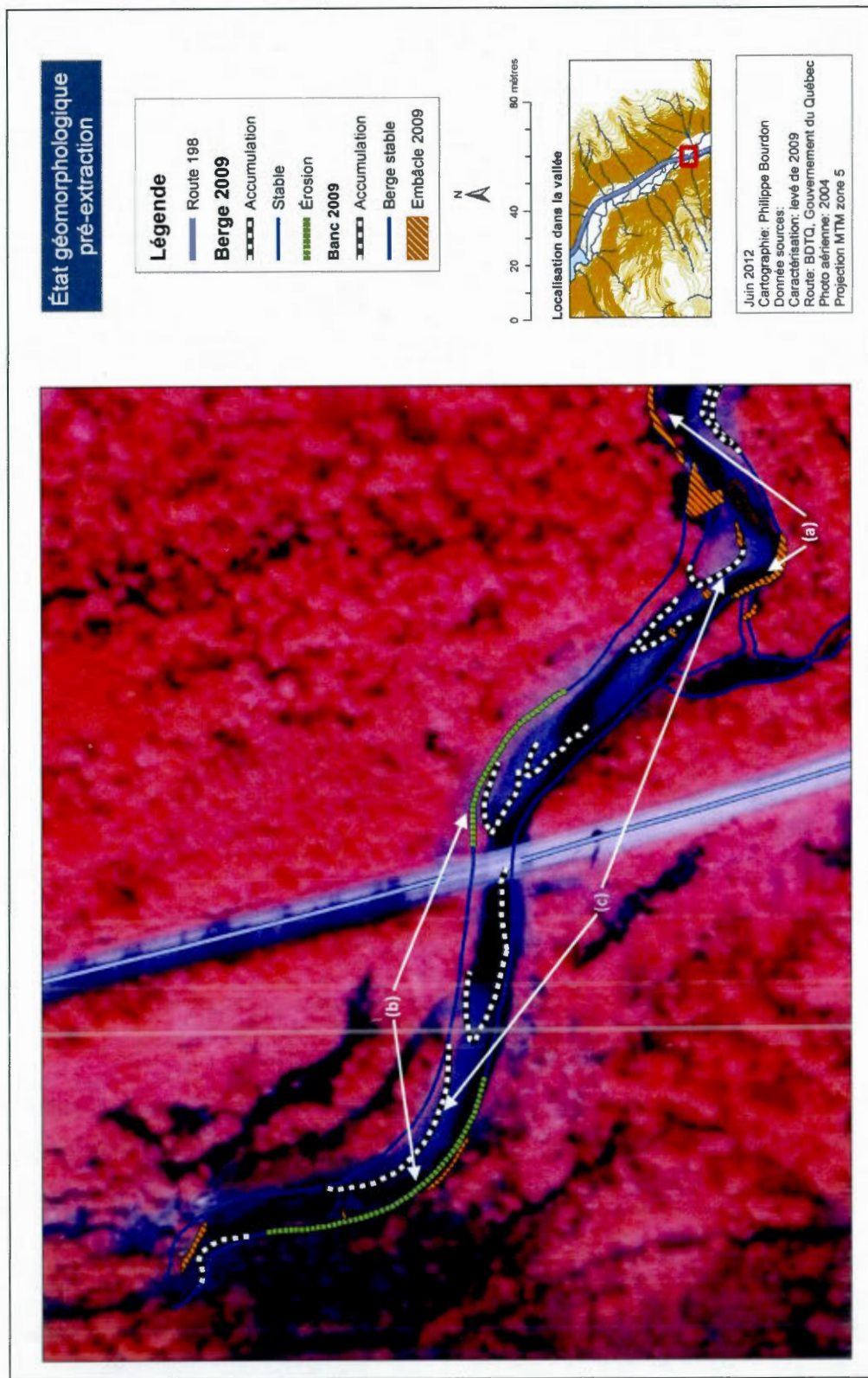


Figure 3.11 : État géomorphologique pré-extraction.

Avant l'exécution des travaux, on retrouvait dans le tronçon à l'étude quatre courbes de méandre, trois en amont du pont et une à l'aval. Les deux premières courbes étaient stables en raison d'importants embâcles de bois qui couvraient toutes leurs rives concaves (figure 3.11 (a); figure 3.12) alors que les deux autres courbes étaient en migration latérale (figure 3.11 (b)). Parallèlement à la migration de ces méandres, on observait la croissance du banc médian en amont du pont et du banc de convexité attaché en aval (figure 3.11 (c)). On note également la présence d'une anabranche sur le côté gauche en amont du pont. Plusieurs bancs sont également illustrés sur la figure. Ils sont pour la plupart en accumulation à leur apex aval. Les bancs dans la zone de dragage ne sont pas végétalisés alors que le banc médian en amont de la zone de dragage est lui en processus de végétalisation. Puisque les arbustes qui le bordent ont 10 à 15 ans, on peut estimer son âge à une vingtaine d'années.



Figure 3.12 : Embâcles de bois couvrant une rive droite en amont.

Il est important de souligner que la migration latérale du chenal est inévitablement liée à un apport de sédiments et, par conséquent, à une évolution des formes du lit. Il est difficile d'évaluer l'influence des débris et des embâcles ligneux sur les photos, mais on peut

imaginer leur rôle. Par exemple, lors d'une visite sur le terrain en période de crue, nous avons observé des niveaux d'eau supérieurs dans le chenal à celui de la plaine. L'embâcle positionné le long des berges concaves jouait alors un rôle de digue.

Enfin, il est également important de souligner l'effet d'étranglement occasionné par le pont, alors que la largeur moyenne du cours d'eau est de 29,9 m, l'ouverture latérale entre les piliers est, elle, de 10,3 m. Cet élément génère un étranglement de près de trois fois la largeur moyenne du cours d'eau. À ce compte, il n'est pas surprenant d'observer le surcreusement d'une fosse en amont et en-dessous du pont, de même que l'accumulation d'un banc central issu d'un refoulement de l'écoulement. Quoique l'étude de Poirier et Niquet (1992) mentionne le problème d'une ouverture latérale insuffisante et le besoin de reconstruction du pont, nous n'avons pas pu trouver d'information sur le choix d'une telle ouverture lors de la conception.

3.2.2 Granulométrie des sédiments du lit

La taille médiane (D50) des sédiments est de l'ordre de 45 mm pour l'ensemble de la zone à l'étude et de 40 mm dans le tronçon dragué. La distribution est variable selon le secteur relevé (figure 3.13), mais on note une diminution de la taille des grains entre la zone amont et aval, diminution correspondant également à une diminution de la pente au droit de la zone draguée. En effet, la pente est évaluée à 0,99 % pour tout le secteur en amont alors que dans la zone draguée, elle se situe à 0,48 %.

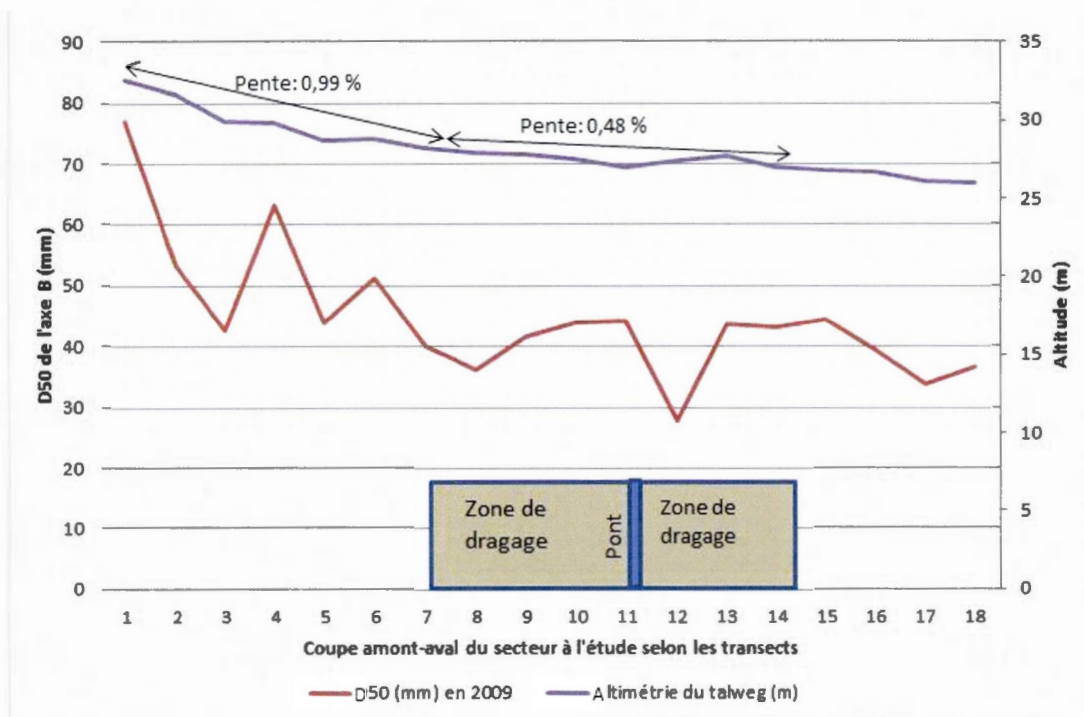


Figure 3.13 : Granulométrie (D50) des sédiments le long de la rivière de l'Anse Pleureuse et pente du talweg.

Dans le secteur dragué, on note une granulométrie faible en amont et légèrement plus élevée dans les transects 9-10-11, au droit du banc amont (figure 3.14). Vis-à-vis de la mouille juste en amont le pont, transect 12 (TM1), la granulométrie est faible. En aval du pont, la granulométrie augmente tout de suite au transect 13 (tv1) pour ensuite diminuer doucement jusqu'à la fin de cette zone. Notons également que la variabilité de la distribution de chaque transect suit les valeurs moyennes puisqu'on retrouve un plus grand écart interquartile pour les transects dont les valeurs sont plus élevées (figure 3.14).

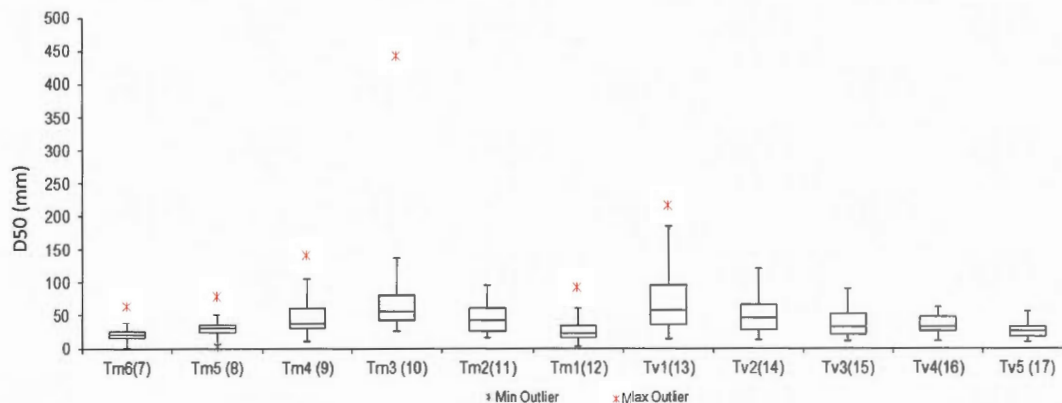


Figure 3.14 : Variabilité de la granulométrie (D50) des sédiments du lit avant les travaux d'excavation.

3.2.3 La nature et l'importance des travaux d'excavation

Les figures 3.15 et 3.16 illustrent la nature des travaux d'excavation en amont et en aval du pont de la route 198. On y observe clairement la disparition des bancs d'accumulation médians et latéraux ainsi que l'enrochement sur la rive droite en amont du pont. La figure 3.17 montre les modèles numériques réalisés à l'aide des relevés topographiques. On y observe clairement les différences topographiques entre la topographie avant les travaux (août 2009) et celle après les travaux (novembre 2009). Les différences topométriques sont illustrées selon deux classes, dans l'optique d'une représentation spatiale des patrons d'accumulation/dépôt et de dragage/érosion. Les différences relevées correspondent dans l'ensemble aux travaux prévus dans l'autorisation environnementale. On y observe la présence de la fosse d'excavation, d'une dimension de 17 m par 290 m, avec leurs raccordements progressifs à l'amont et à l'aval, de même que les zones de dépôt et l'enrochement de 50 m de long.



Figure 3.15 : Photographie de la section amont du pont P02775 avant les travaux (A) et après les travaux (B).

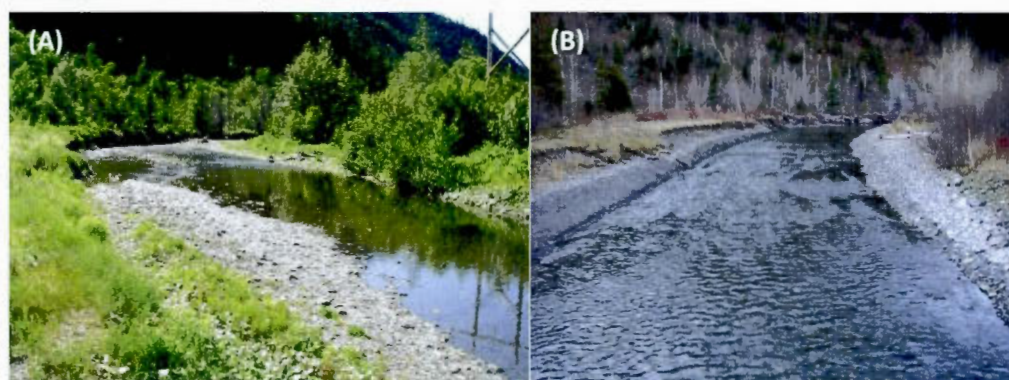


Figure 3.16 : Photographie de la section aval du pont P02775 avant les travaux (A) et après les travaux (B).

La profondeur excavée a été variable en raison de la technique d'excavation et des formes attendues suite aux travaux (figure 3.17). La profondeur excavée a été plus importante sur les bancs d'accumulation que dans le talweg. Les volumes excavés sont de l'ordre de 2883 m^3 en amont et de 3364 m^3 en aval pour un total de $6\,247 \text{ m}^3$. Le différentiel entre l'estimation des volumes à excaver et les volumes excavés mesurés est de l'ordre de 114 %, soit une légère surévaluation des volumes estimés.

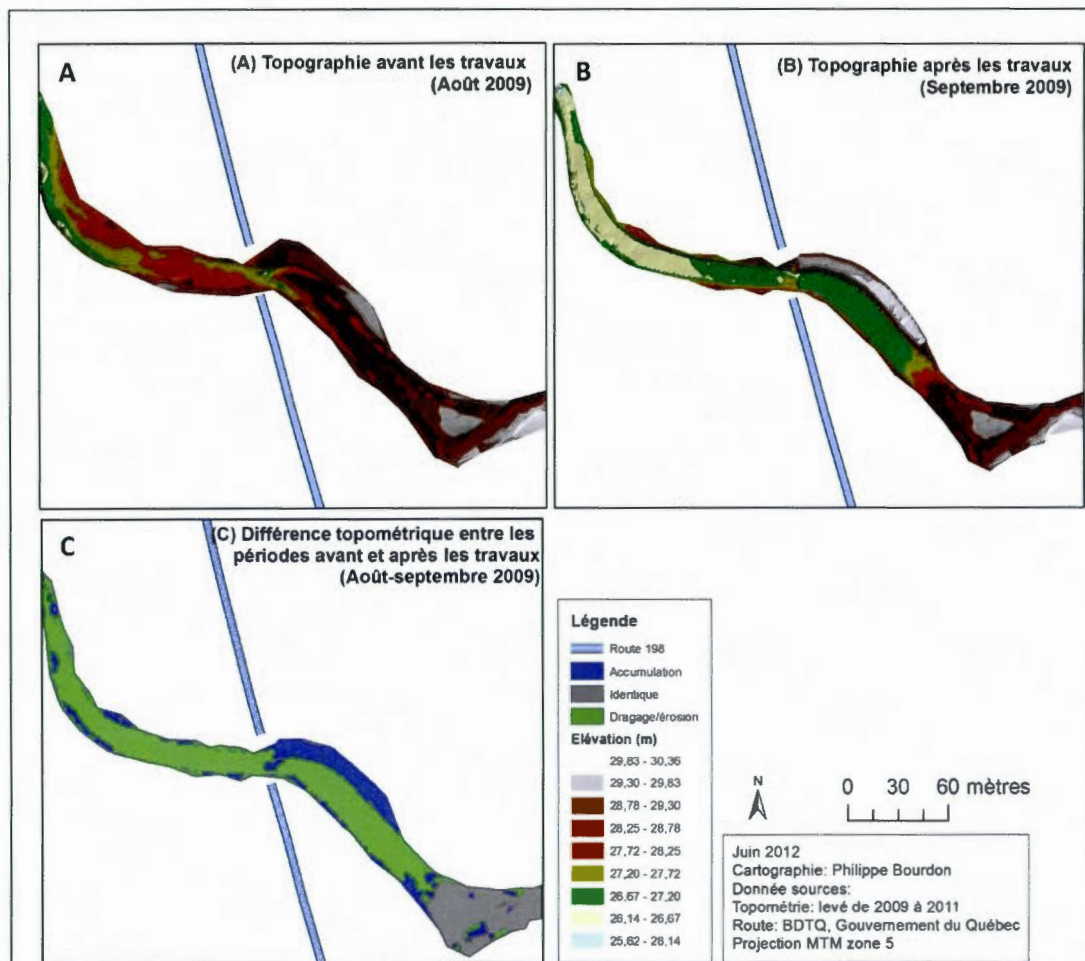


Figure 3.17 : Topographie de la morphologie du lit de la rivière de l'Anse Pleureuse avant et après les travaux d'excavation et différence topographique relevée. Topographie avant les travaux (A); topographie après les travaux (B); Différence topométrique avant-après les travaux (C).

3.3 Ajustements morpho-sédimentaires à la suite des travaux d'excavation

Ce troisième point comprend l'ensemble des résultats d'analyse de la dynamique actuelle en lien avec les travaux effectués dans le cours d'eau. Les résultats des analyses morphologiques et topométriques pour les suivis temporels des ajustements sont présentés de l'aval vers l'amont en quatre points. Les trois premiers sont divisés selon le secteur : aval du pont, amont du pont et amont de la zone de dragage. Le quatrième point s'intéresse à la différence morphologique entre la période avant les travaux à celle à la fin des relevés. Le

dernier point concerne les ajustements granulométriques et le transport sédimentaire observé.

3.3.1 Secteur en aval du pont

La figure 3.18 présente les ajustements morphologiques qui se sont produits au cours de la première et de la deuxième année suivant les travaux dans la section en aval du pont P-02775.

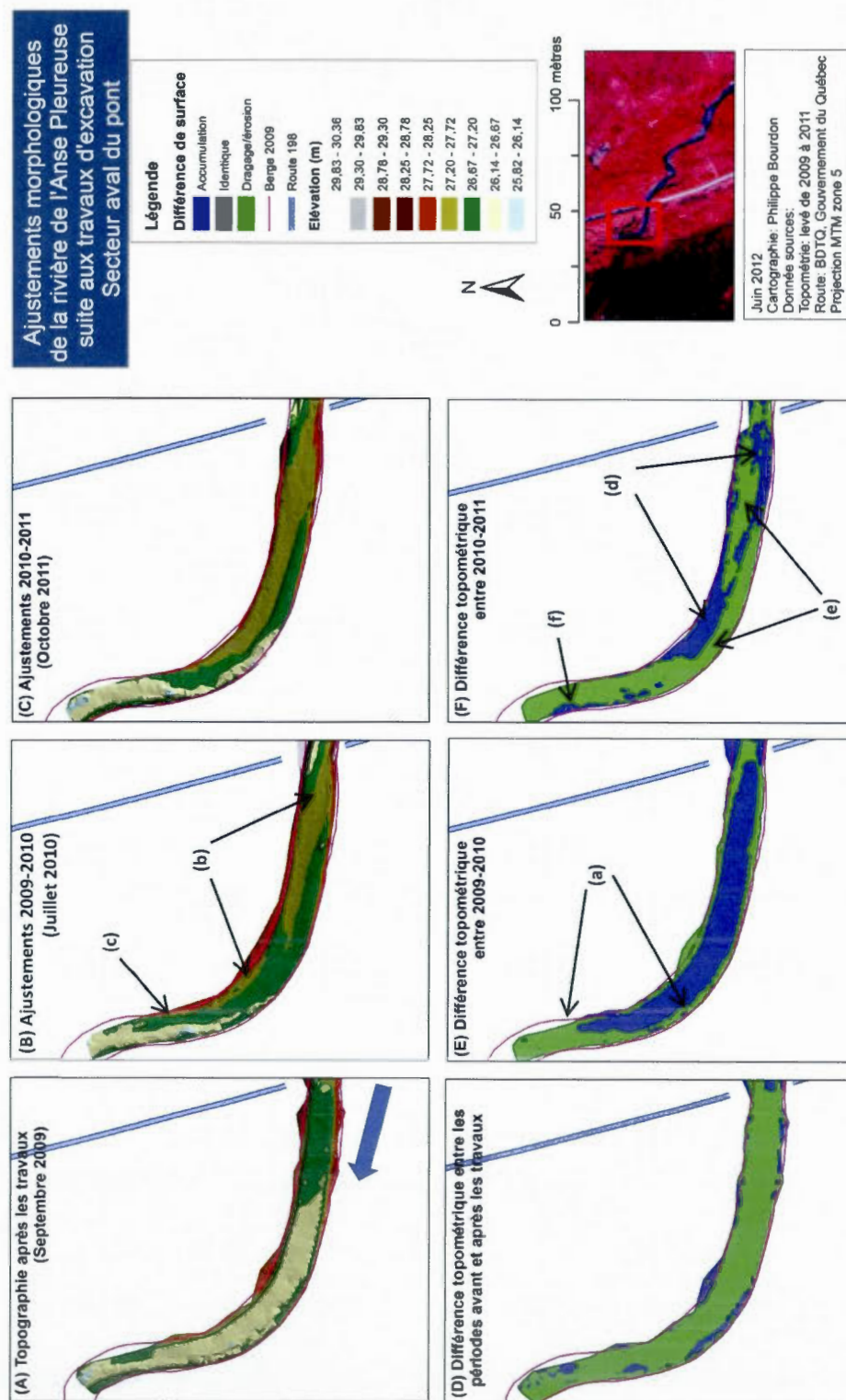


Figure 3.18 : Ajustements morphologiques et différence topométrique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en aval du pont.

Durant la première année d'ajustement, de la sédimentation a été effective dans la grande partie de la zone excavée. On remarque par ailleurs que de l'érosion s'est produite sur le côté droit du lit et à l'apex en aval de la zone excavée (a) (figure 3.18). Bien que de la sédimentation soit observée sur la presque totalité de la largeur, un petit banc de convexité apparaît à gauche en aval du pont et à droite dans la courbe (b). Après cette courbe, l'érosion s'est exacerbée en créant une fosse en rive gauche et l'ensemble du lit s'est abaissé à l'endroit du raccordement progressif qui avait créé une pente inverse à la rivière (c). La somme des volumes de sédiments mobilisée est de 2 070 m³ alors que le bilan est positif avec 1 742 m³ de plus de sédiments dans la zone aval du pont. Le comblement, exprimé en pourcentage de volume de sédiment recouvert dans la fosse par rapport au volume excavé est, dans la section en aval du pont, de 52 % pour la première année.

Durant la deuxième année d'ajustement en aval du pont, la dynamique d'accumulation des deux bancs de convexité s'est poursuivie (d) (figure 3.18), mais les fosses se sont agrandies par érosion (e). On constate l'apparition d'un troisième banc de convexité (f), entremêlé entre des embâcles de bois. La dynamique d'érosion, observée entre 2009 et 2010 dans la zone de raccordement, s'est exacerbée entre 2010 et 2011. En effet, à l'aval du secteur à l'étude, alors que l'on observait une division du chenal en plusieurs chenaux en 2010, on ne retrouve en 2011 qu'un seul chenal. La somme des volumes mobilisés est de 1 201 m³ alors que le bilan est positif avec 515 m³ de plus de sédiments dans la zone aval du pont. Le comblement dans la section en aval du pont est donc de 15 % pour la deuxième année d'ajustement.

3.3.2 Secteur en amont du pont

La figure 3.19 présente les ajustements morphologiques qui se sont produits au cours de la première et de la deuxième année suivant les travaux dans la section en amont du pont.

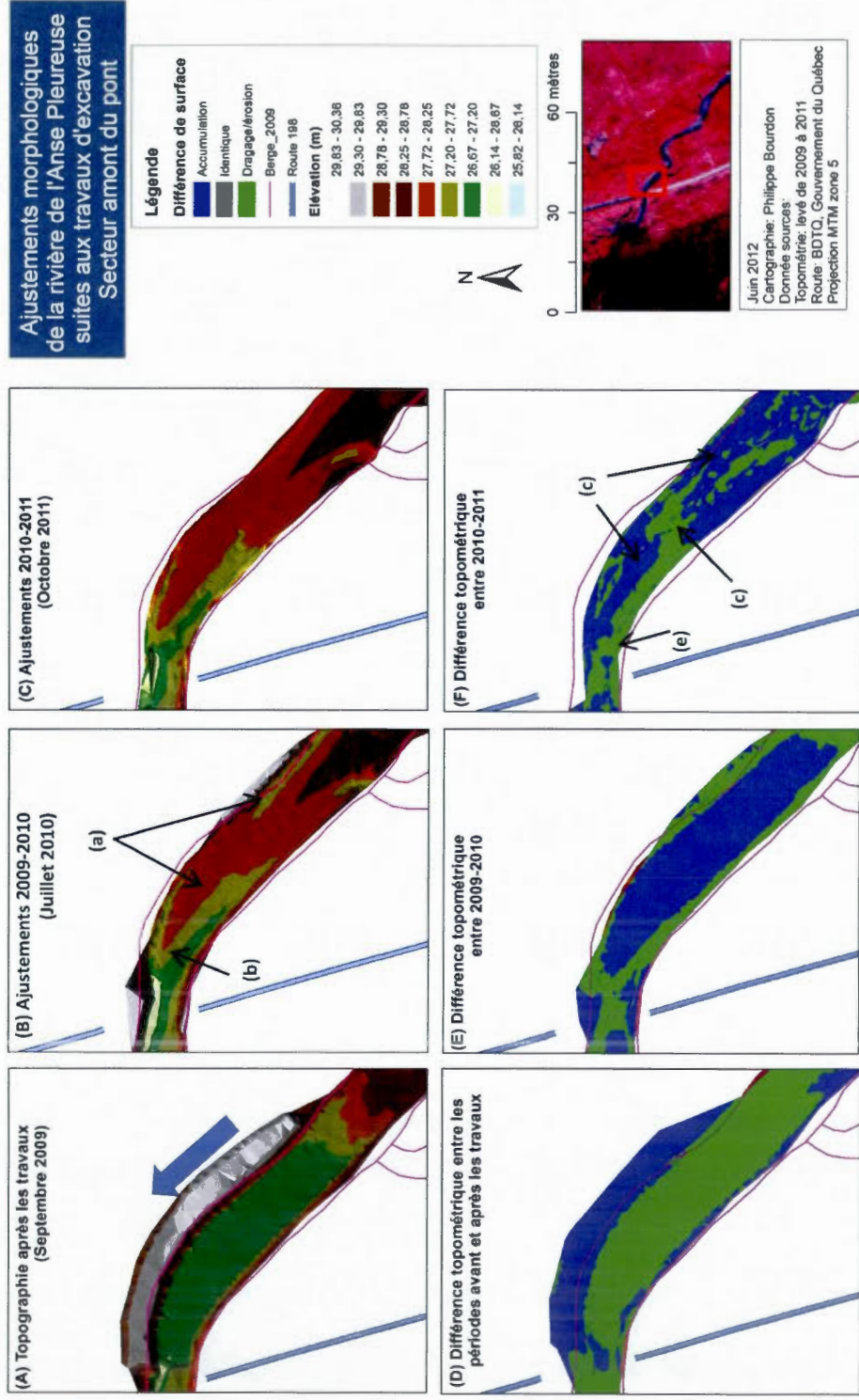


Figure 3.19 : Ajustements morphologiques et différence topométrique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en amont du pont.

On remarque pour la première année que la sédimentation a été effective sur l'ensemble de la surface excavée et que de l'érosion s'est produite sur la rive droite et à l'apex de la zone excavée (a) (figure 3.19). Cette zone d'érosion en rive droite concerne près de 694 m^3 de matériel érodé. Les formes des dépôts sédimentaires accumulées dans la zone excavée sont de l'ordre des formes qui existaient avant les travaux, soit un grand banc d'accumulation en amont droit du pont qui tend à avancer vers la gauche et vers l'aval (b). La somme des volumes de sédiments des zones qui ont subi des modifications (érosion-accumulation) est de $2\,675 \text{ m}^3$, alors que le bilan est positif avec $1\,127 \text{ m}^3$ de plus dans la zone en amont du pont. Ainsi, on peut évaluer le comblement des sédiments à 39 % par rapport au niveau topométrique pré-extraction.

Durant la deuxième année après les travaux, soit entre les mois d'août 2010 et d'octobre 2011, des ajustements morphologiques ont aussi été observés dans le secteur à l'étude, mais ils sont de moindre ampleur que ceux de 2009 à 2010. De la sédimentation a été effective sur pratiquement l'ensemble de la surface excavée en une mince couche additionnée de plus qu'en 2010 (c) (figure 3.19), mais un chenal s'est creusé dans les sédiments accumulés en 2010 (d). On note également de l'érosion dans la fosse directement en amont du pont (e). Près de 22 m^3 de matériel a été érodé à cet endroit. Dans le reste de la zone, la mince couche accumulée concerne 734 m^3 . La somme des volumes de sédiments ayant subi des modifications (érosion-accumulation) est de 609 m^3 , alors que le bilan est positif avec 658 m^3 de plus dans la zone en amont du pont. Le comblement est de l'ordre de 23 % pour cette période par rapport aux volumes excavés.

Les formes des dépôts sédimentaires accumulés dans la deuxième année sont dans la poursuite de la dynamique morphologique amorcée l'année précédente. On y observe de l'accumulation de sédiment sur banc central en amont du pont.

3.3.3 Secteur en amont de la zone de dragage

La figure 3.20 présente les ajustements morphologiques qui se sont produits au cours de la première et de la deuxième année suivant les travaux dans la section en amont de la zone de dragage.

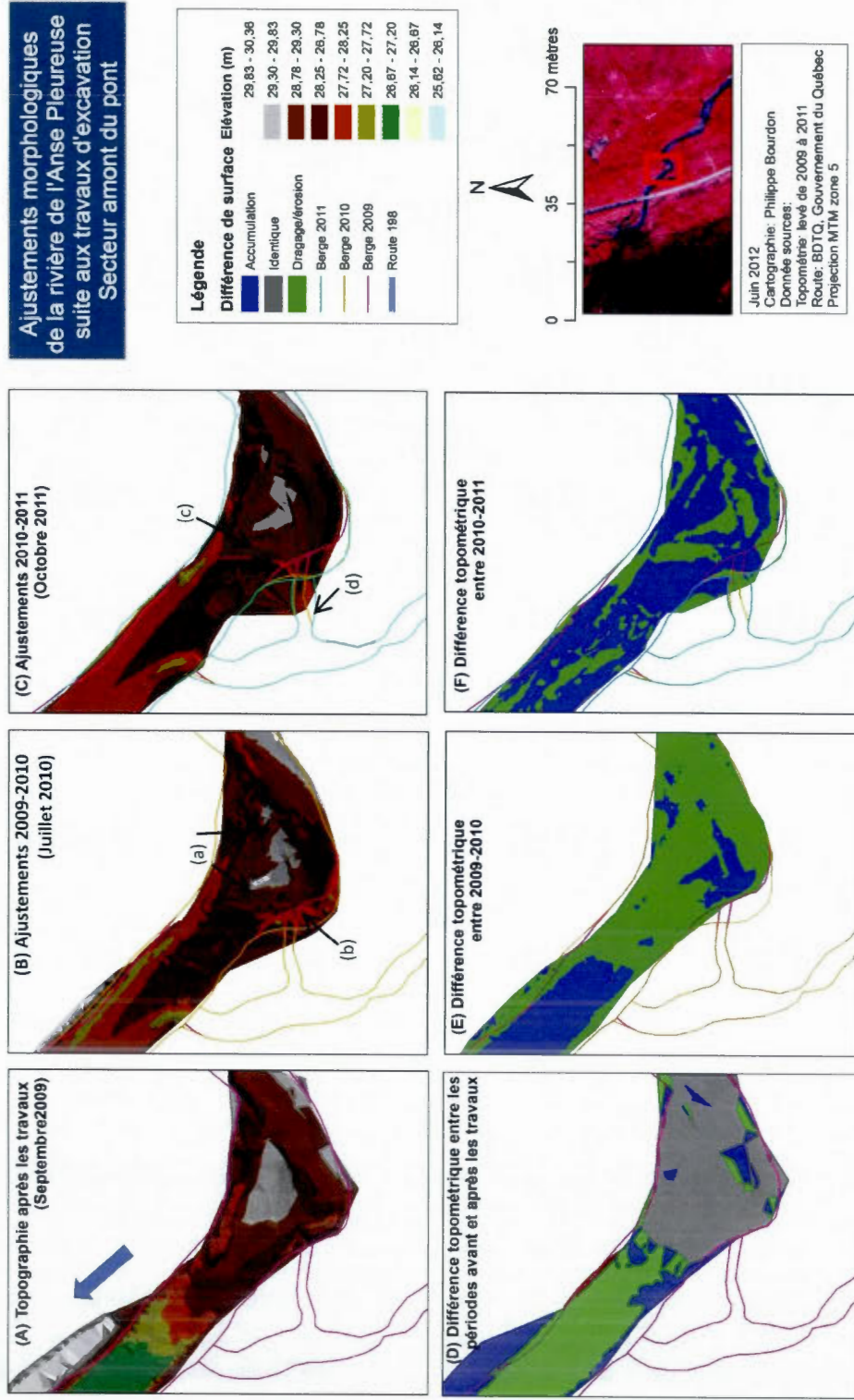


Figure 3.20 : Ajustements morphologiques et différence de topométrie de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie après les travaux; puis ajustement sur 1 et 2 ans. Secteur en amont de la zone de dragage.

La figure 3.20 expose le banc central qui a été érodé durant la première année (a) de même que la zone à son aval donnant sur la zone draguée. Le chenal droit a subi un comblement partiel alors que la fosse du chenal gauche a été agrandie par érosion (b) et a subi une légère migration latérale. D'ailleurs, les limites des berges à cet endroit ont été déplacées. Les résultats suggèrent que les ajustements érosion/accumulation concernent près de $2\,749\text{ m}^3$ de sédiments alors que le bilan est positif avec $1\,325\text{ m}^3$ de sédiments accumulés dans la section. En raison de la couverture des levés, ces volumes ne tiennent pas compte des volumes enlevés dans la fosse et sur la berge lors du processus de migration latérale.

Entre la première et la deuxième année, l'érosion en apex de la zone de dragage qui était effective en 2010 s'est poursuivie en favorisant la création d'un chenal plus important (c) (figure 3.20). De plus, l'accumulation à l'apex du banc avec migration vers la rive gauche du méandre s'est poursuivie. L'embâcle de bois a été détruit par l'écoulement et un chenal à l'endroit de l'embâcle s'est créé pour rejoindre le chenal arrière (d). Notons également que l'exutoire de cette anabranchie s'est également agrandi durant cette période. Les calculs de la topométrie soulèvent que les ajustements érosion accumulation concernent près de 817 m^3 de sédiments alors que le bilan est positif avec 664 m^3 de sédiments accumulés dans la section. Notons que ces valeurs ne tiennent pas compte de la migration latérale et, en particulier, des volumes de sédiments enlevés dans la fosse, qui ne se trouve plus depuis 2010, dans la zone topographiée au début.

3.3.4 Différence morphologique avant les travaux à deux ans

La figure 3.21 présente la différence de topométrie et de morphologie entre la période avant les travaux et celle après les travaux pour l'ensemble du tronçon à l'étude.

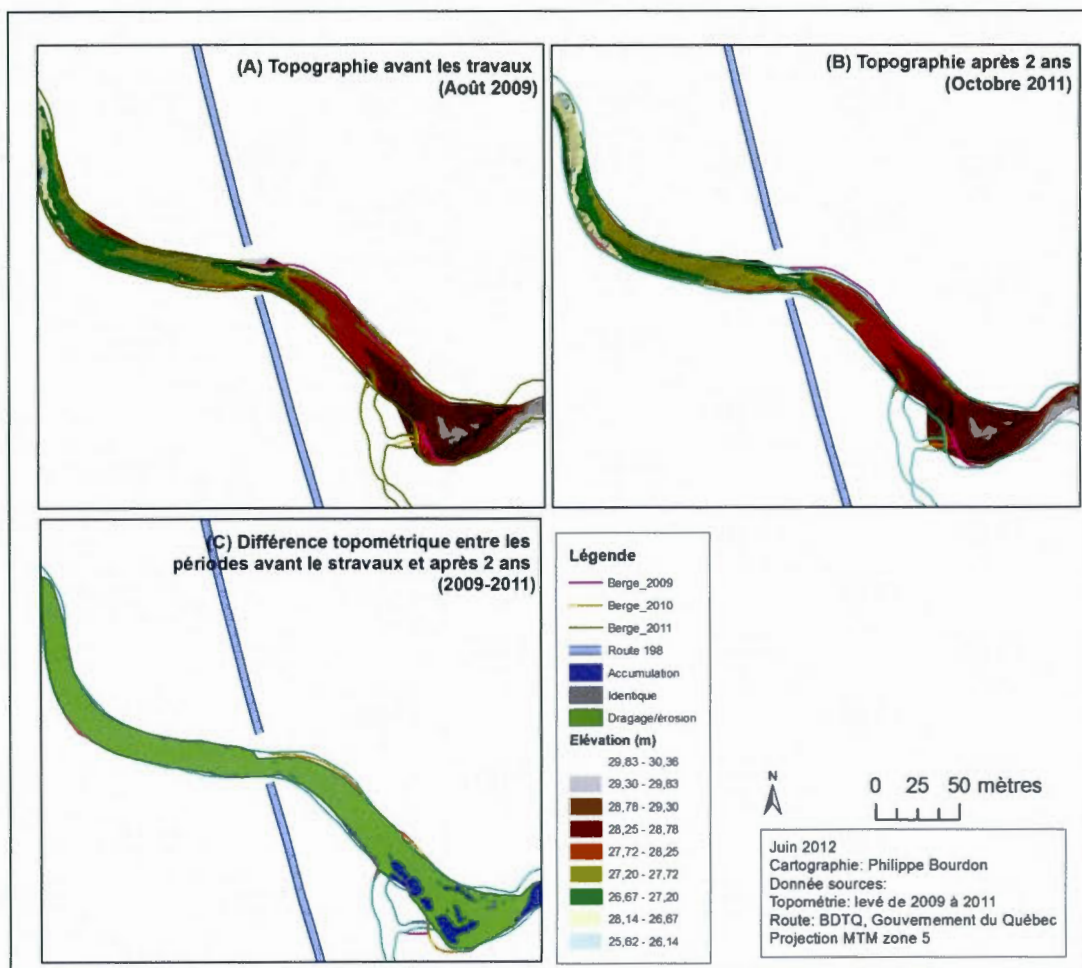


Figure 3.21 : Différence topométrique et morphologique de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation de 2009. Topographie avant les travaux; puis après 2 ans d'ajustements.

La morphologie en 2011 ressemble dans l'ensemble à celle qui existait avant les travaux (figure 3.21). Les formes telles que le banc en amont de la zone de dragage, les bancs centraux en amont du pont et les bancs de convexité en aval se sont reformées aux mêmes endroits qu'elles étaient avant les travaux. Il en est de même pour les mouilles ou les fosses devant les bancs.

Les changements morphologiques importants ont par ailleurs eu lieu en amont et en aval de la zone de dragage. En amont de la zone de dragage, on observe l'érosion et la migration du

banc central, l'érosion de la berge gauche et la suppression de l'embâcle de bois qui protégeait cette même berge. Un chenal s'est développé et rejoint l'anabranchement du côté gauche. En aval de la zone draguée, l'érosion progressive a canalisé un chenal alors qu'il se trouvait à chenal multiple avant les travaux.

Sur l'ensemble de la zone excavée, une différence topométrique demeure entre la période avant les travaux à celle après alors que le bilan volumétrique est à 53 % de sa situation initiale en amont du pont et de 15 % en aval du pont. Le pourcentage correspond à la différence volumétrique entre le volume excavé en 2009 et les changements observés en 2011, suggérant un rapport entre la situation observée et initiale. Puisque ce rapport intègre à la fois une spatialité et des changements morphologiques, les résultats volumétriques de 2009-2011 diffèrent de la simple addition des deux bilans de 2009-2010 et 2010-2011. Le tableau 3.2 synthétise le bilan volumétrique selon les années d'ajustement et selon les secteurs relevés. Au niveau altimétrique, le banc en amont du pont, dont on avait enlevé 1,3 m de sédiments, se retrouve après deux ans, à seulement 0,5 m plus bas que son niveau initial.

Tableau 3.2 : Pourcentage de comblement de la fosse d'excavation selon les années d'ajustements.

Comblement	Bilan après travaux (2009)	Bilan 2009-2010 (an 1)	Bilan 2010-2011 (an 2)	Bilan 2009-2011 (2 ans)
Amont	-2 883 m ³	1 127 m ³ (39 %)	658 m ³ (23 %)	1538 m ³ 53 %
Aval	-3 364 m ³	1 742 m ³ (52 %)	515 m ³ (15 %)	516 m ³ 15 %
Total	-6 247 m ³	2 869 m ³ (46 %)	1 173 m ³ (19 %)	2054 m ³ 32 %

3.3.5 Granulométrie et transport sédimentaire

La granulométrie du lit a également subi des modifications à la suite de l'intervention de dragage. En effet, pour la première période d'ajustement (2009-2010), les observations suggèrent que la taille des grains a diminué en amont de la zone de dragage, alors qu'elle a augmenté dans la zone de dragage en amont du pont et a diminué à l'aval du pont (figure 3.22).

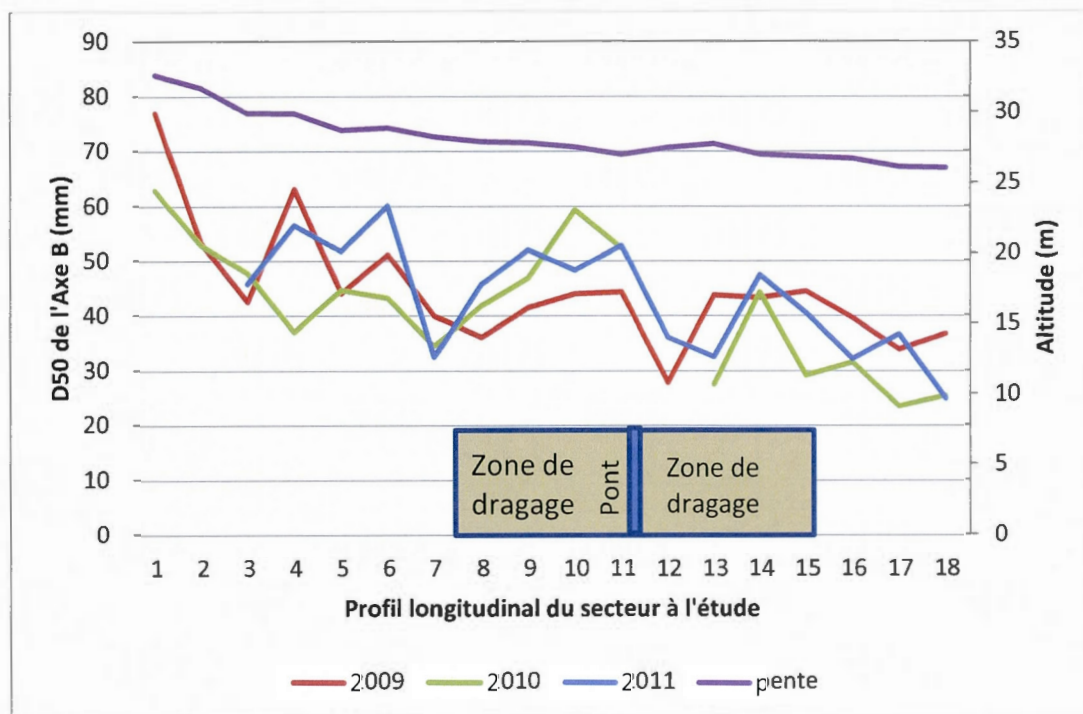


Figure 3.22 : Ajustements granulométriques (D50) suivant les travaux de dragage de 2009.

La moyenne des ajustements dans tout le secteur à l'étude est, pour la première période (2009-2010), une diminution de 4 mm de D50 (figure 3.22). Entre 2010 et 2011, l'augmentation de la taille granulométrique est généralisée (moyenne de 3 mm) mais les secteurs en amont de la zone de dragage et le secteur dans la zone de dragage en aval ont davantage subi cette augmentation. Le secteur directement en amont du pont a, lui, subi une légère diminution de la taille des grains entre 2010 et 2011 (figure 3.22). Enfin, après deux ans d'ajustement, la taille des grains se trouve légèrement moins élevée de 1 mm que celle avant le dragage pour l'ensemble du secteur à l'étude alors qu'on enregistre une légère augmentation de 2 mm dans la zone de dragage (tableau 3.3).

Tableau 3.3 : Ajustement granulométrique du lit aux travaux d'excavation.

Variable D50 (mm)	Avant (2009)	2010	2011
Toute la zone	45	41	44
Zone de dragage	40	39	42

Pour chaque transect relevé dans la zone de dragage, la distribution de la granulométrie des cailloux est variable sur les années de suivi (figure 3.23). Bien que les valeurs moyennes des transects répondent à une certaine dynamique longitudinale entre les années, la variabilité de la taille des grains par transect diffère elle selon les années de suivi. En effet, alors que le transect offrant la plus grande variabilité en 2009 était le transect 13 en aval, ce sont les transects en amont (8 en 2010 et 9 en 2011) qui offrent la plus grande variabilité. Enfin, notons une augmentation notable de la variabilité au dernier transect aval en 2011, alors que les valeurs des années précédentes suggéraient une distribution plus homogène de la taille des grains (figure 3.23).

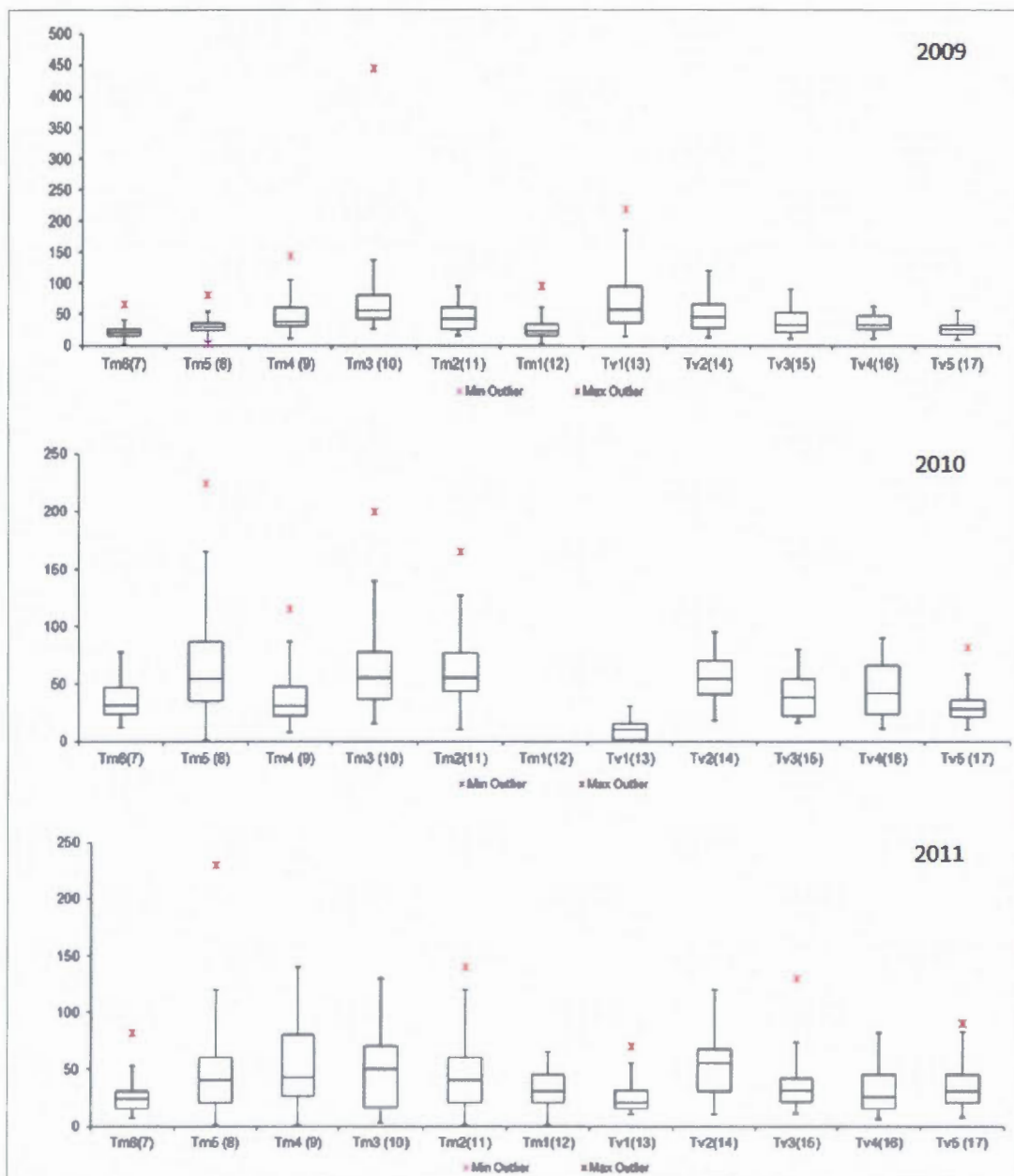


Figure 3.23 : Distribution en boîte et moustache de la granulométrie des cailloux par transect dans la zone draguée.

Le constat le plus probant émanant de l'étude du déplacement des traceurs est que le site de dépôt principal est le banc central en amont du pont (figure 3.24). Ce constat est le même pour l'ensemble des traceurs, peu importe leur site d'origine. En effet, seulement 2

traceurs se sont retrouvés à l'aval du pont, comparativement à 66 traceurs en amont du pont. Notons également que le banc en amont de la zone de dragage n'a pas constitué, durant la période de suivi, une zone de dépôt importante pour les cailloux traceurs. Seuls quelques cailloux s'y sont déposés dans la partie aval droit.

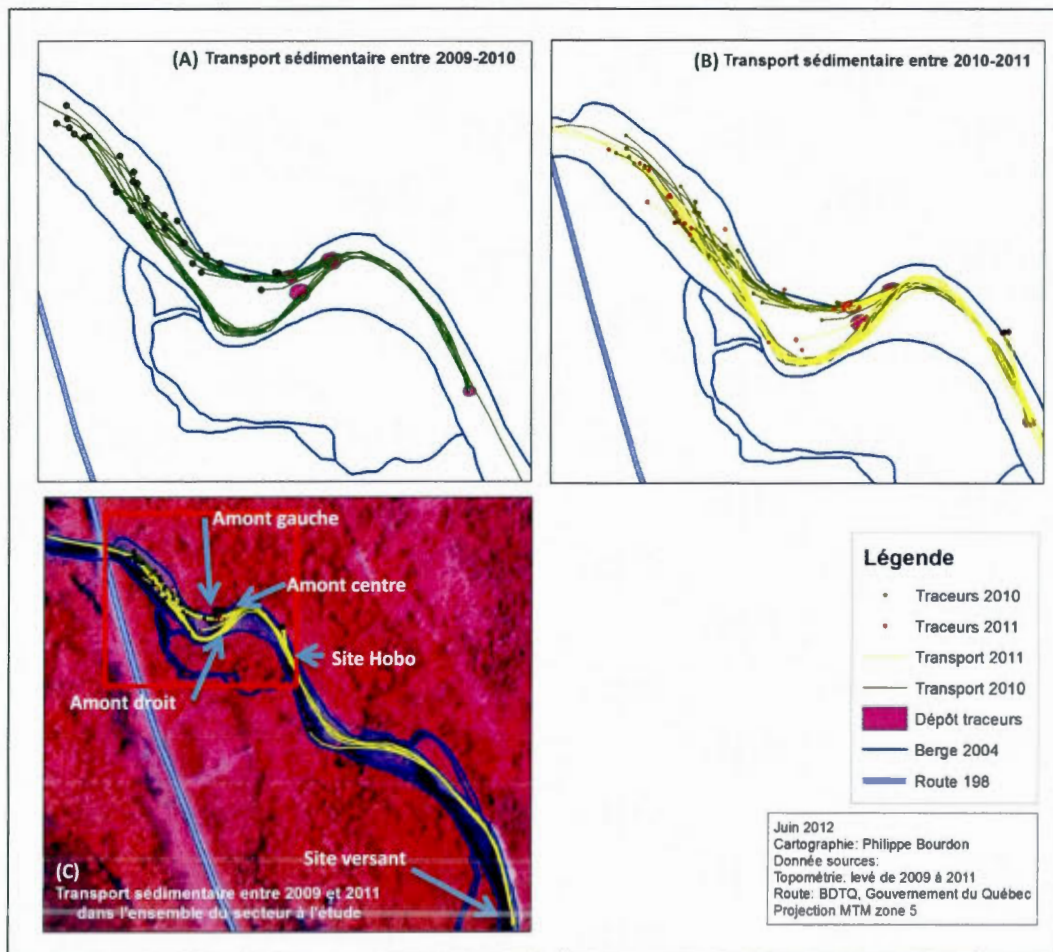


Figure 3.24 : Parcours des cailloux traceurs pour les périodes 2009-2010 (A) 2010-2011 (B) et de 2009-2011 (C) dans la rivière de l'Anse Pleureuse.

Des cinq zones de départ de traceurs, ce sont les trois situées directement en amont de la zone de dragage qui ont été plus actives quant au transport sédimentaire qui s'y est déroulé durant la première période de suivi (2009-2010) (tableau 3.4). D'ailleurs, cette période a généré un transport sédimentaire sur une plus grande distance pour l'ensemble des cailloux

traceurs retrouvé pour cette période (28) avec une distance moyenne de 161 m (tableau 3.4). Pour la période 2010-2011, le transport a été un peu moins important en termes de distance pour la valeur moyenne des 40 traceurs (131 m).

Tableau 3.4 : Déplacement moyen des traceurs à partir de leur origine

Dépôt	Nombre 2010	Distance 2010 (m)	Nombre 2011	Distance 2011 (m)	Nombre total	Moyenne distance (m)
Amont îlot	8	105	8	45	16	75
Droite	7	94	3	118	10	101
Gauche	6	129	2	132	8	130
Hobo	5	212	5	183	10	198
Retour			14	3	14	3
Versant	2	588	5	622	7	613
Non documenté			3	67	3	67
Total général	28	161	40	131	68	

Quoique la période 2010-2011 ait mobilisée davantage de traceurs dont leur origine était plus loin en amont, la valeur de déplacement moyenne est atténuée pour cette période par le fait que quelques traceurs retrouvés en 2010 ont aussi été retrouvés au même endroit ou très proche en 2011. Ainsi, c'est 14 traceurs qui ont été retrouvés à moins de 2 m de distance de la position identifiée en 2010. En faisant abstraction de ces 14 traceurs, la moyenne de distance parcourue pour 2011 passe à 194 m. Notons également que les relevés en 2010 et 2011 n'ont pas pu bénéficier de la même résolution de repérage pour tout le secteur en amont que celui utilisé pour le tronçon du dragage et proximal à celui-ci. Ainsi, il est fort probable que plusieurs traceurs de la provenance du dépôt le plus en amont aient parcouru leurs courses durant les deux périodes plutôt que durant la seule période de 2010-2011. Par conséquent, les valeurs de transport moyen seraient plus basses. Étant donné ces deux éléments reliés à la méthodologie, les valeurs de transport pour la deuxième période doivent davantage être considérées à titre indicatif.

La distribution des événements de mobilité pour les deux années a été générée à partir du seuil de débit spécifique critique de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$, appliquée sur la série temporelle de débit

(figure 3.25). Rappelons que le débit spécifique a été évalué à la lumière du volume de sédiment capté dans la fosse de dragage durant la première année de comblement intégré dans l'équation empirique de Schoklitsch's (1934) (dans Gob *et al.*, 2005) pour un débit critique de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce seuil a été validé avec l'équation de la puissance spécifique critique de Costa (1983, dans Petit, 2005) pour une valeur similaire : $6,15 \text{ m}^3/\text{s}$.

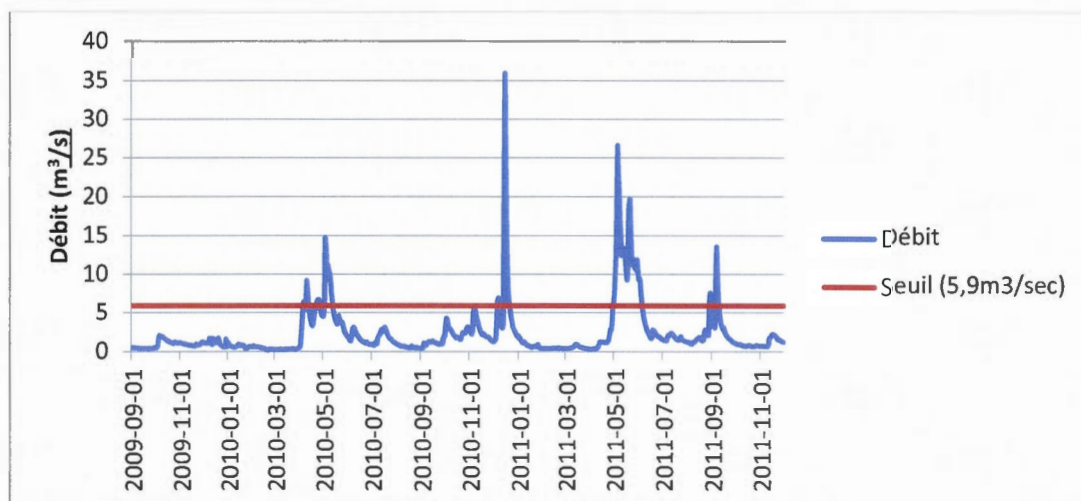


Figure 3.25 : Événements de mobilité durant la période de suivi.

Durant la première année, avec le seuil de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$, deux événements ont eu lieu au printemps sur 16 jours alors que la deuxième année, les trois événements cumulent 48 jours de mobilité et sont répartis entre l'automne 2010, le printemps 2011 et l'automne 2011. L'événement de l'automne 2010 correspond à la tempête Irène avec 7 jours de seuil hydrologique critique; celui du printemps comprend 35 jours de mobilité alors qu'un dernier événement de mobilité a eu lieu en septembre 2011 avec 6 jours de mobilité.

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Le chapitre de la discussion est articulé autour de trois points. Le premier point porte sur la dynamique des ajustements morphosédimentaires et discute des constats géomorphologiques et des processus responsables des modifications observées. Le deuxième point porte sur le dragage et l'équilibre géomorphologique et questionne sur la pertinence et l'efficacité des travaux réalisés. C'est aussi dans ce point que l'équilibre du régime sédimentaire est discuté. Enfin, le troisième point traite de la gestion des cours d'eau au Québec et discute de la place de la géomorphologie dans la gestion des cours d'eau et, plus précisément, dans le processus de planification de travaux en rivières. Des recommandations quant à la suite de cette étude y sont exposées.

4.1 Dynamique des ajustements morphosédimentaires

Cette section s'intéresse à la dynamique des ajustements observés dans le tronçon et aux processus qui en sont responsables. La section est organisée en trois points correspondant pour les deux premiers aux ajustements des zones amont et aval du pont, le troisième point traite de la dynamique temporelle des ajustements.

4.1.1 Dynamique des ajustements en amont du pont P-02775

Dans la zone de dragage, le comblement de près de 52 % dès la première année et de 15 % pour la deuxième année conduit à un taux de résilience inférieur à celui sur la rivière Tolka estimé à 100 % sur trois mois (Karle, 2007). Rappelons que ces travaux s'adressaient à un dragage de plus faible ampleur. Toutefois, la résilience de la rivière de l'Anse Pleureuse est plus rapide que sur la rivière Semois, où le comblement n'est que de 17 % pour les quatre

premières années cumulées (Gob *et al.*, 2005). Sur la rivière Fraser, Rempell (2004) observe un taux de résilience de 31 %, réparti sur les trois années suivant les travaux.

L'érosion vers l'amont, à partir de la zone de raccordement, pourrait être attribuée à un processus d'érosion régressive, tel que mentionné par Kondolf *et al.* (2002) pour les rivières ayant subi de l'excavation. Les auteurs décrivent ce processus comme l'ajustement du profil en long, avec une augmentation de la force d'entraînement liée à une pente plus forte dans la zone de raccordement, puis à une perte de cette compétence dans la fosse, où la sédimentation devient effective. Rappelons que dans certains cours d'eau, tel que sur la rivière Malnant en France, l'érosion régressive s'est propagé sur des kilomètres en amont (Marston *et al.*, 2003).

Les observations suggèrent que, sur la rivière de l'Anse Pleureuse, l'érosion régressive a agi effectivement vers l'amont dans le chenal principal, mais également vers l'amont dans l'anabranchement peu actif (figure 4.1). De plus, l'embâcle de bois mort dans la courbe en amont a été détruit par l'écoulement entre 2010 et 2011. Cette destruction de l'embâcle de bois mort a donné lieu à la création d'un chenal à partir de la courbe jusque dans l'anabranchement. Il y a lieu de se demander si l'érosion régressive, en augmentant la compétence de l'écoulement au droit du banc, n'a pas eu un effet en déstabilisant l'embâcle de bois mort qui circonscrivait la courbe et dirigeait l'écoulement dans le chenal principal. Le résultat est l'activation de l'anabranchement par la création d'une nouvelle connexion et la direction d'une partie importante de l'écoulement dans cette anabranchement.

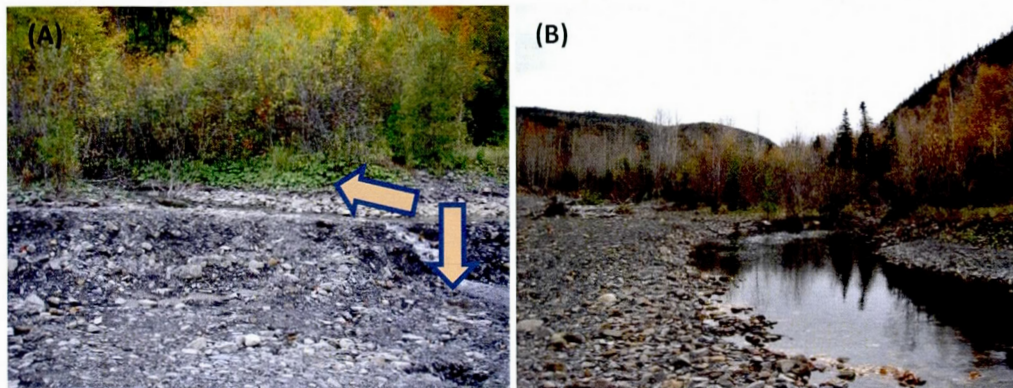


Figure 4.1 : Processus d'érosion régressive et d'activation d'une anabranch. Début de l'érosion régressive immédiatement après les travaux (A); élargissement de l'anabranch après 2 ans d'ajustement (B).

La comparaison des résultats avec d'autres cas est difficile puisque les cas de dragage ponctuels à cette résolution sont plus rares en comparaison des cas de dragage intensif historique. Des cas d'érosion régressive observés dans des rivières à méandres montrent que l'érosion régressive suit le tracé en plan du cours d'eau, même si, parfois, les berges peuvent être déstabilisées par l'incision (Kondolf, 1994; Gob *et al.*, 2005). En revanche, les cas où l'érosion régressive, à la suite de travaux d'excavation dans une rivière divagante, mène à une modification du tracé en plan en amont par l'activation de chenaux secondaires n'ont pas été relevés dans la littérature. Le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse pourrait toutefois se comparer à des cas où l'excavation a été réalisée dans le lit moyen et que le cours d'eau a capturé la zone lors de coups d'eau importants par divers processus d'érosion régressive (Kondolf, 1997).

4.1.2 Dynamique des ajustements à l'aval du pont

En aval du pont, les effets des travaux d'excavation ont été différents. Rappelons que les observations montrent un comblement de 52 % la première année et une perte entre la première et la deuxième année. Rappelons également que le chenal à l'aval des travaux se terminait en chenaux multiples alors qu'il était devenu chenal simple durant la deuxième année d'ajustement.

L'analyse des modifications morphologiques laisse à supposer qu'un processus d'érosion progressive s'est mis en place à partir de la zone de raccordement alors qu'un différentiel important a été créé entre la fosse et le lit, exposant une pente inverse dans la zone de raccordement. À partir du petit chenal qui s'est créé dans cette zone de raccordement, l'érosion a produit un élargissement de ce petit chenal puis une incision du lit qui s'est propagée vers l'aval, expliquant l'évolution de chenal multiple à chenal simple.

Les données de volume de sédiments déplacés chaque année suggèrent que le processus d'érosion régressive s'est produit par étape. Ainsi, comme la zone de raccordement faisait office de digue à sa mise en place et qu'elle n'a été incisée qu'en partie la première année, cet élément a pu contribuer à la sédimentation dans la fosse par une diminution de la compétence de l'écoulement. Durant la deuxième année, l'augmentation de l'incision a mené un écoulement plus compétent, ayant entraîné des sédiments déjà déposés durant l'année précédente. Ce processus ne serait pas étranger au fait que la structure de l'écoulement est passée de fosse de sédimentation à un écoulement dynamique de rivière entre la deuxième et la troisième année. D'ailleurs, les données montrent également la présence de bancs alternes, de seuil et de mouille en 2011 sur l'ensemble de la zone, suggérant un retour à un écoulement dynamique de rivière en séquence de seuils et de mouilles. Ces changements n'impliquent toutefois pas de modifications de la largeur du chenal, du moins, celle-ci ne serait pas perceptible avec les données recueillies.

4.1.3 Dynamique temporelle des ajustements

La magnitude des ajustements a été variable entre les divers éléments relevés. Ainsi la granulométrie présente l'impact le plus prononcé la première année d'ajustement (diminution de 4 mm) alors que l'impact se résorbe la deuxième année avec un retour à un diamètre plus près de celui avant les travaux (diminution de 1 mm). Concernant le comblement de sédiments par rapport à ce qui a été enlevé en amont du pont, il se situe à 39 % la première année et à 23 % la deuxième année. À l'aval du pont, le comblement a été

important la première année (52 %) mais ce comblement s'est atténué la deuxième année (15 %) en raison d'un autre ajustement lié à l'érosion progressive vers l'aval.

D'un point vu morphologique, les ajustements à l'intérieur de la zone draguée sont plus importants la première année, alors que le retour à une morphologie initiale s'était mis en place dès la première année puis, poursuivi la deuxième année. Par contre, des ajustements en amont et en aval de la zone excavée ont été plus prononcés la deuxième année alors que des changements majeurs ont été enregistrés. En effet, durant la deuxième année d'ajustement, l'embâcle de bois en amont a été détruit et un chenal secondaire s'est créé et a rejoint l'anabranchement auparavant peu active. En aval de la zone de dragage, un changement de chenal multiple à chenal simple s'est réalisé durant la deuxième année d'ajustement.

Surian et Rinaldi (2003) ont mentionné que les ajustements à des perturbations étaient asymptotiques, soit importants immédiatement après la perturbation, puis de moins en moins importants. Ces constats émergent de l'examen de 27 cas de dragage intensif historique en Italie. Les éléments relevés concernent entre autres le niveau d'élévation du lit et la propagation de l'érosion. Avec le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse, il est intéressant d'observer que ce phénomène s'observe également à l'échelle d'un suivi de deux ans pour une seule perturbation. Bien que certains éléments aient été quantifiés alors d'autres éléments avaient été évalués de manière qualitative, il est possible d'apprécier la distribution temporelle des ajustements selon les éléments relevés et observés (figure 4.2). Les différences entre l'avant et l'après travaux ont été ramenées en pourcentage pour ce qui est de la granulométrie et de la topométrie. Les ajustements morphologiques évalués ont été convertis en pourcentage également.

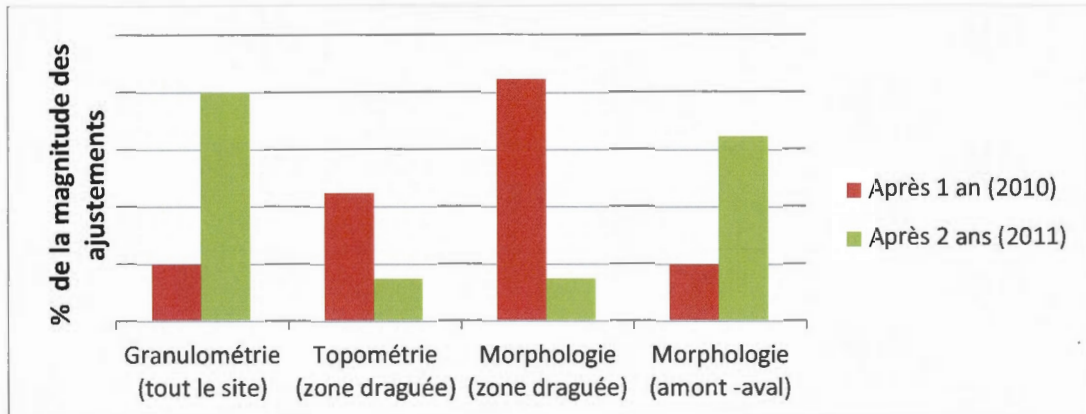


Figure 4.2 : Dynamique temporelle des ajustements morphosédimentaires de la rivière de l'Anse Pleureuse aux travaux d'excavation

Il ressort de cette analyse que la magnitude des ajustements topométriques et morphologiques est plus importante dans la zone perturbée au début et qu'elle s'atténue par la suite, suggérant un retour à un équilibre morphologique, malgré une topométrie inférieure à celle du début.

La granulométrie sur tout le site, de même que la morphologie en amont et en aval de la zone perturbée présente une dynamique inverse avec un ajustement plus important la deuxième année. Pour ce qui est de la granulométrie, avec des valeurs se rapprochant de l'état initial (+2 mm), il y a lieu de se questionner si un état d'équilibre n'a pas été retrouvé durant la deuxième année d'ajustement. Il est fort possible que le fait d'avoir enlevé toute la couche de pavage, constituée de grains plus grossiers, ait joué pour diminuer la taille des grains observés après un an d'ajustement. Par contre, ce phénomène semble s'être atténué la deuxième année d'ajustement alors que la taille des grains s'est vue augmenter à des valeurs supérieures à celles relevées avant les travaux. Il est possible que l'augmentation des tailles granulométriques soit associée à des changements dans les directions d'écoulement dans le tronçon.

Pour l'aspect de la morphologie en amont et en aval de la zone draguée, il est possible que les changements observés n'en soient qu'à leurs débuts. En particulier en amont, où l'apparition d'un nouveau chenal secondaire pourrait être un indicateur d'un basculement du tracé vers cette zone. D'ailleurs, rappelons que le tracé de 1963 empruntait en partie ce secteur. L'absence de données de suivi supplémentaires nous empêche d'estimer l'évolution de la magnitude des ajustements à venir.

4.2 Dragage et équilibre géomorphologique

Cette section, centrée sur l'équilibre morphologique du cours d'eau s'intéresse dans un premier temps à l'effet des travaux sur l'équilibre du cours d'eau. Par la suite, un deuxième point s'intéresse à l'équilibre morphologique historique en questionnant les variations observées en regard de perturbations du flux du régime sédimentaire.

4.2.1 Dragage, effets escomptés et effets observés

Rappelons que les travaux d'excavation avaient pour but principal d'abaisser le lit afin d'augmenter l'espacement entre le pont P-02775 et le lit, en permettant le libre passage d'un volume d'eau plus important. Les travaux visaient également l'enlèvement du banc central devant le pont qui peut être responsable du dépôt des arbres morts et peut affecter l'écoulement sous le pont. Enfin la construction d'un enrochement de 50 m en amont sur la rive droite était désirée pour restreindre la migration latérale du méandre en amont du pont.

Les données récoltées ont montré que l'ajustement topographique du cours d'eau était particulièrement important dès la première année, avec 39 % de comblement de la fosse en amont et 52 % à l'aval. Après 2 ans d'ajustement, la différence topographique directement en amont du pont demeure minime. Alors que 1,3 m de profondeur de sédiments ont été enlevés au droit du banc, le banc reconstitué se retrouve, après 2 ans, à seulement 0,5 m plus bas que celui antérieur aux travaux. Ainsi, par rapport au niveau du lit désiré et celui observé après deux ans, on peut estimer que les travaux, en considérant la réponse

géomorphologique, ont atteint 38 % de leurs objectifs. Ces données suggèrent un questionnement sur l'efficacité des travaux de dragage à l'échelle choisie, pour abaisser le lit du cours d'eau. De plus, selon les travaux de Gob et al. (2005), dans des conditions similaires, il semble que l'abaissement du lit sur seulement un petit tronçon n'aurait qu'un effet minime sur la hauteur d'eau. Ce phénomène serait en lien avec le profil longitudinal de la surface de l'eau en période de crue. L'absence de données concernant le débit et la hauteur de l'eau avant et après les travaux à l'Anse Pleureuse ne permet pas de vérifier le constat soulevé par Gob et al. (2005) sur la rivière Semois. Dans le cas d'une réédition d'intervention de dragage, le suivi de la hauteur de l'eau devrait être considéré comme une avenue de recherche.

Il est intéressant de se questionner sur la référence au concept d'abaissement du niveau du lit dans le but d'abaisser le niveau d'eau afin de prévenir les inondations. En effet, provient-il de référence d'ingénierie ou de géomorphologie? Dans le cas de la géomorphologie, des études de cas ont démontré que ce concept est effectif lorsque les travaux ont été intensifs durant de longues années et lorsque l'incision du lit est généralisée sur une grande partie de cours, et non seulement sur une section. Considérant également que les travaux visaient l'enlèvement du banc central devant le pont afin d'atténuer le risque d'embâcle au droit du pont, force est de constater que celui-ci s'est reformé dès la première année. Ce constat peut s'expliquer par la réponse morphosédimentaire du système à la structure de l'écoulement, elle-même en lien avec la forme du chenal dont les contraintes des piliers du pont font partie. En effet, le pont, dont les piliers ont une ouverture de 10,3 m, contraint l'écoulement par un étranglement de plus de 60 %. Cet étranglement à l'écoulement provoque une perte de compétence et, par conséquent, le dépôt des sédiments qui était transporté par cet écoulement. Puisque la structure de l'écoulement au droit du pont n'a pas été modifiée par les travaux d'excavation, il n'est pas surprenant de voir apparaître de nouveau un banc central, même s'il est d'une hauteur, pour l'instant, légèrement inférieure à celle qui précédait les travaux. Pour cet objectif, en considérant la réponse géomorphologique du système, l'effet escompté des travaux demeure nul.

Un des aspects dont la planification des travaux ne faisait pas mention est l'effet des travaux de dragage sur la stabilité du cours d'eau, notamment sur le tracé en plan. Seul l'avis géomorphologique faisait mention d'une réponse probable de l'évolution du tracé à moyen et long terme, mais ne prévoyait pas de changements importants à cet égard. Cette évaluation qualitative s'était appuyée sur le fait que le tracé en plan ne serait pas modifié par les travaux. Le manque de données quantitatives pour la rivière de l'Anse Pleureuse n'a pas permis, lors de cette évaluation sommaire, d'anticiper les changements qui allaient se produire. Toutefois, les données recueillies ont permis de constater qu'à l'intérieur de la zone draguée, le tracé en plan du chenal de même que les formes se sont reconstitués selon un patron semblable à celui avant les travaux. Par contre, les zones proximales, directement en amont et en aval de la fosse d'excavation, ont vu leur patron morphologique se transformer. En aval de la zone draguée, le tracé en plan à chenal multiple a été modifié pour un tracé en plan à chenal simple. En amont de la zone draguée, l'activation de l'anabranchement en rive gauche et la migration latérale du méandre par la suppression de l'embâcle de bois mort sont éloquentes à cet effet. Ainsi, même si la prédiction de l'avis géomorphologique de Bourdon et Leclerc (2009) mentionnaient la possibilité d'activation de processus d'érosion régressive, elle n'avait pas anticipé l'érosion régressive dans l'anabranchement, ni l'enlèvement de l'embâcle de bois dans la courbe amont.

La situation actuelle de l'écoulement en amont, qui emprunte le nouveau chenal pourrait devenir problématique pour le MTQ, à moyen terme, puisque ce tracé se rapproche de la route 198. Cet aspect pourrait s'exacerber par la poursuite de la migration latérale qui s'est activée avec l'enlèvement de l'embâcle de bois mort. Ce secteur devrait d'ailleurs faire l'objet de suivi. Cette importante modification illustre que des travaux d'excavation en rivières peuvent avoir un effet considérable sur la stabilité du tracé en plan du cours d'eau. Cet élément devrait être pris en compte lors d'une planification subséquente de travaux similaires en rivières.

Concernant l'enrochement, il convient de mentionner qu'il n'a pas subi d'impact et n'a pas eu d'effet sur la morphologie du lit. Ce constat est probablement lié au fait que l'enrochement a été positionné exactement là où la berge était et n'a ainsi pas changé la structure de l'écoulement de manière considérable, à part peut-être la rugosité du lit au droit de cet enrochement.

L'un des aspects peu investigués dans cette étude, dont l'impact a été sous-estimé au regard de la stabilité du cours d'eau, est la présence d'embâcle de bois mort sur les berges. En effet, les embâcles de bois morts ancrés dans des méandres semblent avoir joué un rôle capital dans l'orientation de la structure de l'écoulement. D'ailleurs, lors de la visite de terrain en période de crue (avril 2010), nous avons pu observer une hauteur d'eau supérieure dans le chenal à celle du sol dans la plaine, l'écoulement étant retenu dans le chenal par un embâcle de bois mort tel que le ferait une digue. Le fait que l'embâcle de bois directement en amont de la zone de dragage soit le seul à avoir été détruit par les hautes eaux n'est probablement pas étranger aux changements induits par l'érosion régressive dans ce secteur. L'effet de l'enlèvement de cet embâcle pourrait être lié à la création d'un chenal secondaire qui rejoint l'anabranchement.

4.2.2 Équilibre morphologique historique

L'analyse historique a évoqué que la largeur moyenne de la rivière de l'Anse Pleureuse a subi une augmentation entre les années 1975 et 1986, pour ensuite diminuer jusqu'en 2000 et finalement augmenter à nouveau (figure 4.3). La période d'augmentation correspond à une période où le potentiel de transport a été plus élevé, notamment avec les pointes de 1977, 1979 et 1981. Par contre, il n'y a pas eu de signal d'augmentation de largeur pour la période 1963-1975 alors que le potentiel de transport a été très élevé en 1963 et 1966. Il demeure toutefois difficile d'établir une corrélation statistique entre ces variables puisque les taux de transports potentiels sont hypothétiques et peut-être éloignés du transport réel qui s'est produit. Le développement d'une méthode fiable en vue d'acquiescer des données sur le taux de transport historique demeure la pierre angulaire d'une compréhension

adéquate du régime sédimentaire historique de la rivière, responsable des changements morphologiques observés.

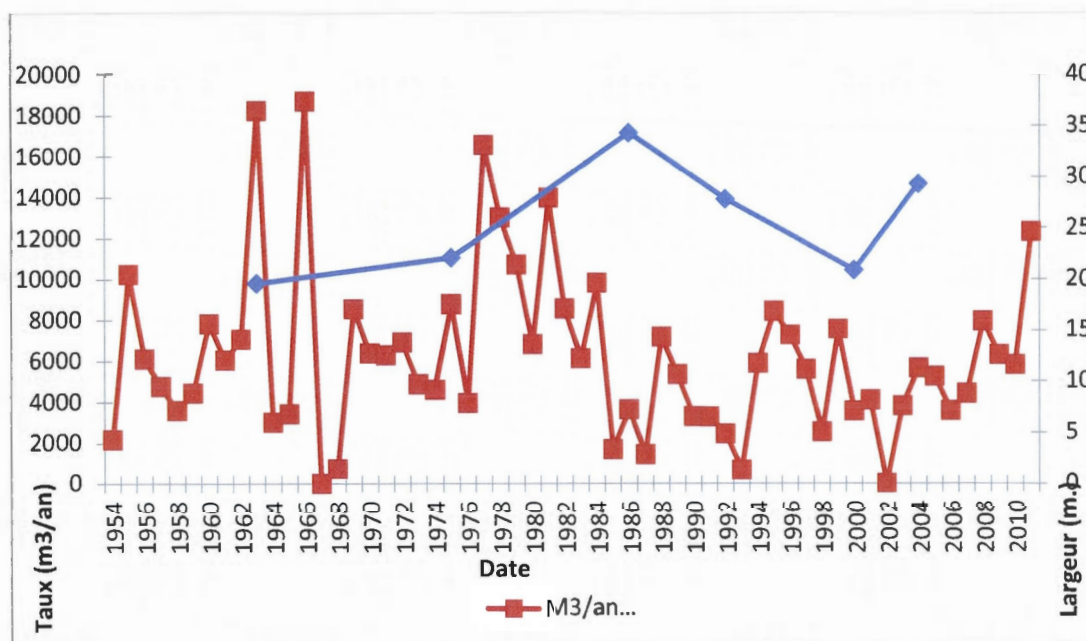


Figure 4.3 : Comparaison de la largeur moyenne annuelle de la rivière au taux de transport sédimentaire potentiel de la rivière de l'Anse Pleureuse (débit spécifique critique de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$).

Il est également intéressant de rappeler que l'augmentation de largeur, notamment en 1986, correspond à une période de développement d'anabranch. Il est possible que cette dynamique s'explique par un comblement du chenal principal, une augmentation de la hauteur du lit mineur et donc une dérivation d'une partie de l'écoulement dans des anabranches secondaires. Cette forte variation de la largeur, pouvant impliquer une variation de la profondeur, s'interprète par un apport sédimentaire plus important que la capacité de transport durant une période, puis cet « excédent » serait transporté par la suite lors d'évènements de transport, mais durant des périodes où il n'y a pas « d'excédent ». D'ailleurs, rappelons que Caron (2009) avait ciblé deux évènements pluviométriques ayant impacté les infrastructures de Transports Québec en 1980 par de la torrencialité (figure 4.4).

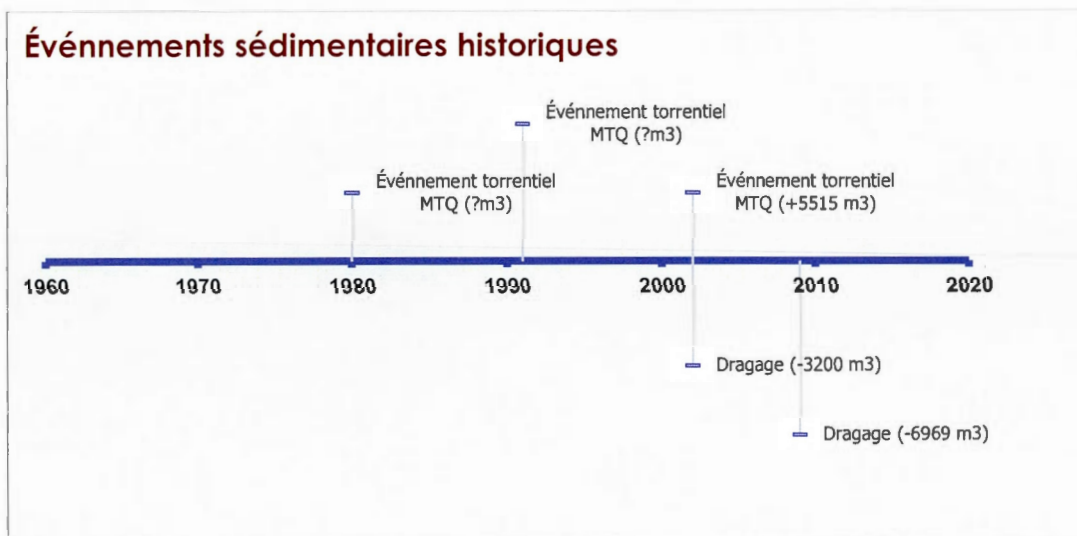


Figure 4.4 : Apports/retraits sédimentaires historiques extérieurs au flux naturel (excavation, apport torrentiel).

Puisque l'évènement de 2002 a apporté une charge supplémentaire au système estimé à 5 515 m³, il est possible que celui de 1980 ait également apporté une charge significative. La variation morphologique pourrait ainsi s'expliquer par ce type d'apport « extérieur » au flux « normal » du régime sédimentaire.

Rappelons également que le site à l'étude se situe dans la zone de rupture de pente entre le versant (3,6 %) et la plaine (0,3 %) et qu'il y a donc une perte de compétence à cet endroit. Une analyse de la dynamique de la compétence et des taux de transports, entre le secteur du versant et la plaine, serait nécessaire pour pouvoir valider cette hypothèse de variation de la profondeur/largeur en lien avec les apports sédimentaires et la dynamique de dissipation temporelle de « l'excédent sédimentaire ».

Enfin, l'analyse des données hydrométriques présente un problème majeur pour l'évènement pluviométrique du 7 août 2002. En effet, alors que le signal de cet évènement n'est pas perceptible dans la série temporelle hydrométrique, ce signal hydrologique a été documenté par Transports Québec à l'Anse Pleureuse et a été enregistré pour la station de

la Cascapédia (station 11003). Ce constat vient du fait qu'il n'y pas eu de signal hydrologique sur la rivière York, à partir duquel la série temporelle de débit à l'Anse-Pleureuse a été générée. Ce constat met en lumière les limites de l'utilisation de données extérieures au système alors que des événements locaux, tels que des cellules orageuses très localisées, peuvent avoir une grande influence.

4.2.3 Estimation du taux de transport sédimentaire historique

Bien que l'utilisation de l'équation de Schoklitsch (1962 dans Gob *et al.*, 2005) dans le but de définir le débit spécifique critique à $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$ ait donné un résultat très proche de celui généré avec l'équation de Costa (1983) à $6,15 \text{ m}^3/\text{s}$, cette équation pose un problème lorsqu'on l'applique autrement. En effet, en utilisant le même seuil de $5,9 \text{ m}^3/\text{s}$ dans l'équation sur la série temporelle de débit de la deuxième année de suivi, on remarque que le résultat ($18\,097 \text{ m}^3$) est de beaucoup supérieur à celui mesuré avec la topométrie ($1\,173 \text{ m}^3$).

Ce constat met en lumière quelques éléments. Contrairement à l'étude de Gob *et al.* (2005), dont les volumes n'ont pas été relevés pour chacune des trois années du suivi, le cas de l'Anse Pleureuse permet de soulever que l'équation de Schoklitsch (1932 dans Gob *et al.*, 2005) fonctionne bien pour la première année de suivi, mais qu'elle surestime ce taux de transport pour les périodes subséquentes. D'abord, il est possible que la perturbation par dragage génère une période où le transport potentiel soit utilisé au maximum par le cours d'eau qui est en recherche d'équilibre. Ainsi, cette équation demeure intéressante pour connaître le transport potentiel total d'un cours d'eau, mais semble s'éloigner du transport réel qui peut se produire lorsque le système se rapproche d'un état d'équilibre. L'équation utilisée prédit ainsi la capacité de charge, qui est équivalente à la charge seulement lorsque l'apport en sédiments égale ou excède la capacité de transport. En plus des éléments limitant l'entraînement des sédiments que sont la granulométrie, le pavage, l'imbrication des sédiments, l'angle de pivot, l'élévation du lit et des protrusions locales (Powell, 1998), il y a lieu de se questionner si, à une échelle macroscopique, l'équilibre morphologique est également un élément de résistance du lit à l'entraînement des sédiments. Puisque les

formes du lit, dont la distribution organisée des seuils et des mouilles, sont la résultante morphologique d'un système hydromorphologique en équilibre, il est possible qu'une perturbation de la morphologie, telle que le dragage, soit une cause d'un taux de transport plus important suivant la perturbation et s'atténuant par la suite. L'application ou le développement d'un indice d'équilibre avec une variable quantifiable est possiblement l'une des avenues de recherche à investiguer afin d'ajuster les équations hydrauliques et mieux cerner l'écart entre le transport potentiel et le transport réel se produisant dans les cours d'eau.

4.3 La gestion des cours d'eau

Cette dernière section, axée sur la gestion des cours d'eau, discute des lacunes de la présente étude et des connaissances nécessaires pour une compréhension adéquate de la dynamique morpho-sédimentaire de la rivière de l'Anse Pleureuse, dans l'optique d'une gestion adéquate de ce cours d'eau, avec lequel les infrastructures du MTQ doivent cohabiter. Enfin dans une perspective élargie, un dernier point ouvre une réflexion sur la place qu'occupe la géomorphologie fluviale dans le processus de gestion des cours d'eau au Québec et la pertinence de l'implication de celle-ci.

4.3.1 Recommandations sur le type d'étude

Cette étude, en évaluant des aspects géomorphologiques dans une gestion interventionniste de problématiques sédimentaires, a soulevé des constats quant à l'approche méthodologique et a soulevé des questions quant à l'application de ce type d'étude en support à la planification et la gestion de la dynamique sédimentaire des cours d'eau.

Tout d'abord, il convient de mentionner que l'étude s'est avérée incomplète en matière d'étendue des levés topographiques. En effet, dans le contexte où nous n'avons pas envisagé un changement aussi draconien en amont de la zone draguée et en considérant la présence d'une végétation dense, les levés topométriques dans la plaine ont été limités aux

rives actives du cours d'eau. Cet aspect a dû être modifié lors du dernier relevé, mais, étant donné que nous n'avions pas les données antérieures aux modifications, les changements dans ces zones n'ont pu être quantifiés.

La présente étude a également permis de mettre en lumière qu'une intervention de dragage, avec la création d'une fosse, avait un effet escompté modeste sur la présence d'un banc en amont du pont, mais des effets indésirables sur la stabilité du tracé du cours d'eau, notamment en raison de l'érosion régressive en amont et de l'érosion progressive en aval. Il y a lieu de se questionner sur le choix d'une intervention majeure sur une distance linéaire de moins de 300 m. Il est possible que ce choix d'intervention ait été influencé par le fait qu'une intervention de plus de 300 m linéaires dans un cours d'eau requiert un processus d'autorisation plus complexe (étude d'impact); ce critère ne devrait toutefois pas être considéré lors de choix du type d'intervention et de l'étendue spatiale de celle-ci dans le cours d'eau. D'ailleurs, une étude plus exhaustive au préalable aurait peut-être permis de soulever certaines lacunes quant à l'intervention choisie et de mieux orienter sa conception.

La suppression de sédiments du système peut s'avérer une avenue à considérer lorsque des apports anthropiques importants de sédiments ont lieu dans le système suite à des processus naturels et modifient le bilan sédimentaire, tel que la torrentialité en 2002. Par contre, des techniques d'excavation plus respectueuses de la dynamique naturelle du cours d'eau auraient avantage à être évaluées. Ces techniques visent en général à maintenir la structure de l'écoulement et les formes du lit en place en enlevant uniquement les accumulations récentes sur les apex des bancs. Karle et Kenneth (2007) ont utilisé ces techniques d'érosion régressive sans conséquence majeures comme celle que nous constatons dans la rivière de l'Anse Pleureuse. En plus d'une répartition spatiale plus élargie des travaux d'excavation, ceux-ci pourraient être optimisés également par une répartition temporelle.

En fait, le peu d'efficacité de travaux effectués en regard de l'effet escompté, couplé à des effets indésirables d'activation de la dynamique fluviale en amont et en aval, dans le contexte d'une rivière aussi dynamique et dont le régime sédimentaire est fortement variable, donne lieu de se questionner sur la nécessité de mettre en place un programme de suivi de la dynamique morpho-sédimentaire, où des interventions ponctuelles pourraient être planifiées en réponse à des événements sédimentaires dans le bassin versant.

4.3.2 Apports de la géomorphologie dans la gestion des cours d'eau

Quelle est la place de la géomorphologie fluviale dans la planification de l'aménagement du territoire et dans la planification des interventions dans les systèmes fluviaux? Cette étude, par la caractérisation de la trajectoire historique et par l'évaluation de l'ajustement morpho-sédimentaire pose certaines balises quant au rôle de la discipline dans le processus de planification pour ce type d'environnement fluvial au Québec.

Par exemple, la caractérisation de l'évolution du tracé en plan a permis de constater, à l'échelle de tout le secteur à l'étude, que certains tronçons étaient plus statiques dans le temps que d'autres. Cet aspect est particulièrement intéressant quant à la réflexion sur l'aménagement de structures sur le territoire, tel que des routes. Le choix dès le départ de positionner les structures dans des secteurs plus statiques éviterait des interventions à moyen et long terme pour stabiliser les cours d'eau. Cette notion s'attache à celle de corridors fluviaux qui n'a cependant pas été abordée dans la présente étude.

Dans le même ordre d'idées, la caractérisation historique du tracé en plan a permis de constater que la largeur du cours d'eau était un aspect fortement variable dans le temps et à l'échelle du secteur pour ce type de cours d'eau, alors que la variation moyenne de la largeur est de l'ordre 12,3 m pour une largeur moyenne de 25 m. Cet élément soulève des questionnements sur les paramètres pris en compte dans la conception. D'ailleurs, l'étranglement du cours d'eau actuel de près de 60 % est probablement en lien avec la présence du banc central devant le pont, en raison d'un effet de refoulement. La conception d'une nouvelle structure, en intégrant non pas une largeur unique issue d'un portrait

statique mais la variabilité de la largeur du cours d'eau, permettrait peut-être une conception plus harmonieuse avec ce type de cours d'eau plutôt dynamique.

Concernant le choix d'une stratégie d'excavation pour diminuer le niveau d'eau, cette étude suggère qu'elle n'était peut-être pas la plus pertinente en raison de l'augmentation de l'instabilité du lit en amont et de son efficacité estimée à 38 % en raison du comblement rapide de la fosse. L'intégration d'un programme de suivi géomorphologique basé sur des analyses de bilans sédimentaires permettrait de cibler (1) le type d'intervention à réaliser (2) la portée spatiale et temporelle de ces interventions, ceci afin d'éviter les effets indésirables d'activation de processus d'érosion régressive tout en réalisant des interventions plus harmonieuses avec la dynamique naturelle du cours d'eau. De plus, l'approche par bilan sédimentaire permettrait de cibler des interventions d'entretien en prévention, en réponse à des événements hydrosédimentaires ponctuels dans le temps, dans une optique de maintien d'un équilibre dans le bilan sédimentaire, lui-même en lien avec les variations dans le patron d'écoulement en plan et la largeur du cours d'eau.

Enfin, alors que plusieurs disciplines environnementales ont un rôle plutôt consultatif, soit après que les projets à réaliser aient été définis, il semble que les apports techniques de la géomorphologie fluviale auraient avantage à être positionnés en amont des projets, soit dans la phase de planification. Les différents aspects mentionnés soulignent qu'une caractérisation adéquate du dynamisme des environnements fluviaux apporterait un éclairage supplémentaire aux planificateurs de l'aménagement et aux concepteurs de projet. Ceci, dans l'optique de mieux cerner des particularités des systèmes fluviaux et d'optimiser l'aménagement et les projets dès le processus de planification.

Bravard *et al.* (1999) ont mentionné que le processus d'intégration de la géomorphologie dans le domaine appliqué par l'essor de l'ingénierie géomorphologique débute vers 1980 en France. Hooke (1999), pour sa part, estime que les géomorphologues contribuent aux travaux de génie appliqués depuis les années 1990. Il demeure surprenant à ce compte que

la discipline soit si peu intégrée dans les processus de planification d'aménagement et d'intervention en cours d'eau au Québec. Quoi qu'il en soit, des cas comme l'Anse Pleureuse soulignent l'importance d'une compréhension adéquate du comportement des cours d'eau et de l'intégration de cette compréhension dans la planification des interventions susceptibles de modifier l'équilibre hydrosédimentaire des cours d'eau.

CONCLUSION

Des cas d'interventions en rivière comme celui du dragage de sédiment dans la rivière de l'Anse Pleureuse exposé dans le cadre de ce mémoire soulignent l'importance d'une compréhension adéquate du comportement du cours d'eau et de l'intégration de cette compréhension dans la planification des interventions affectant l'équilibre hydrosédimentaire des cours d'eau. La présente étude visait à relever les ajustements morphosédimentaires de la rivière de l'Anse Pleureuse à la suite de travaux de dragage et à évaluer la pertinence de l'intervention en regard de considérations géomorphologiques.

Un suivi topométrique et granulométrique de deux ans a permis de quantifier les ajustements géomorphologiques alors que des analyses historiques ont amené à reconnaître le comportement et la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière. Des événements en relation avec des perturbations dans le régime sédimentaire ont pu être identifiés.

Les résultats ont mis en lumière que le recours au dragage dans le but d'augmenter l'espacement hydraulique et de supprimer un banc n'a eu qu'un effet temporaire puisque le comblement de la fosse débute dès le premier événement morphogène et que les formes du lit se rétablissent également selon ce même délai dans la fosse d'excavation. Après deux ans d'ajustement, le comblement est évalué à 52 % en amont du pont et à 15 % en aval. Ce comblement n'est pas uniforme ni graduel, particulièrement à l'aval où la première année, la fosse a eu un effet de capture de sédiments plus important que ce que l'érosion progressive a libéré durant la deuxième année. Par ailleurs, l'impact majeur concerne l'augmentation de l'instabilité du tracé en plan, particulièrement en amont de la zone

draguée mais également en aval. En amont de la fosse, l'érosion régressive a amené des modifications morphologiques se traduisant par l'enlèvement d'un embâcle de concavité, qui protégeait la berge gauche, l'activation d'une migration latérale de cette berge et le développement d'une anabranchie. L'érosion régressive atteint également une anabranchie en rive gauche qui, gonflée par l'écoulement de la nouvelle anabranchie en amont, pourrait devenir problématique en regard de la route 198 à moyen terme.

L'analyse historique a mis en lumière un comportement prompt de la rivière se traduisant par des pulsations épisodiques de la largeur du chenal dont les variations sont de l'ordre de 10 m sur une moyenne de 25 m. Le régime hydrologique présente également des fluctuations importantes, mais le taux de transport historique demeure un élément à développer afin de mieux cerner le bilan sédimentaire et le régime hydrosédimentaire de la rivière. Les estimations des événements sédimentaires majeurs, en dehors du flux normal de sédiment, indiquent toutefois que la rivière a subi historiquement des variations importantes de régime sédimentaire.

Les méthodes d'estimation du transport de sédiments historiques par migrations des méandres pour les rivières à méandres (Neil, 1971 dans Pyrce et Ashmore, 2003) et par migration des bancs (Rice et Church, 2009) se sont avérées infructueuses pour la rivière de l'Anse Pleureuse en raison de la dimension de la rivière, de la qualité des photos aériennes et de la marge d'erreur associée à ces deux paramètres. Une méthode de quantification du taux de transport historique pour ce type de rivière demeure un défi méthodologique.

L'originalité de cette étude se rapporte à l'opportunité de documenter des interventions en rivière permettant l'analyse du niveau de compréhension du système dans le processus de planification des interventions et par l'évaluation de l'efficacité du choix des interventions effectuées. Plusieurs auteurs (Gilvear, 1999; Bravard, 1999 ; Spink, 2009) mentionnent que les travaux réalisés en rivière s'adressent aux symptômes plutôt qu'aux causes sous-jacentes sans prise en considération du système dans son ensemble. La présente étude montre que

la géomorphologie fluviale, de par sa compréhension holistique des hydrosystèmes, apporterait un bénéfice également au Québec si elle était intégrée au processus de planification des stratégies de gestion des rivières.

BIBLIOGRAPHIE

- Benyahya, L. , Daigle, A., Caissie, D., Beveridge, D. et St-Hilaire, A. 2009. «Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'est du Canada». *Rapport de recherche R1057, Pêches et Océans Canada, Région du Golfe, INRS-ETE, Université du Québec, University of New-Brunswick*.
- Bourdon, P. 2008. «Fiche hydrogéomorphologique des sites routiers sensibles à la dynamique fluviale, le long de la route 198 et de la rivière de l'Anse-Pleureuse». *Ministère des transport du Québec*, p. 14.
- Bourdon, P. 2009. «Compte rendu réunion et visite terrain du 7 juillet, problématique d'écoulement de la rivière de l'Anse-Pleureuse». *Ministère des Transports du Québec*, p. 8.
- Bourdon, P. et Leclerc, A.M. 2009. «Avis géomorphologique concernant les travaux d'entretien et de prélèvement des matériaux du lit du cours d'eau aux abords du pont P-02775 de la rivière de l'Anse-Pleureuse, route 198. ». *Ministère des transports du québec, Direction du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Iles-de-la-Madeleine, Service des inventaires et du plan*, p. 12.
- Bravard, J. P., Landon, N., Peiry, J.-L. et Piegay, H. 1999. «Principles of engineering geomorphology for managing channel erosion and bedload transport, examples from French rivers». *Geomorphology*, vol. 31, p. 291-311.
- Bravard, J.P. 2009. «Discontinuities in braided patterns: The River Rhône from Geneva to the Camargue delta before river training». *Geomorphology*, vol. article in press
- Buffin-Bélanger, T. et Hétu, B. 2008. «Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'Est du Québec. ». *Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion.*, 594p.
- Burge, L. M. 2005. «Wandering Miramichi rivers, New Brunswick, Canada». *Geomorphology*, vol. 69, no 1-4, p. 253-274.
- Burge, L. M. 2006. «Stability, morphology and surface grain size patterns of channel bifurcation in gravel-cobble bedded anabranching rivers». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 31, no 10, p. 1211-1226.

- Caron-Fournier, É. 2009. «Stratigraphie, sédimentologie et dynamique d'un petit cône alluvial holocène du nord de la Gaspésie». *Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski*, p. 126.
- CEHQ. 2012. «Débits et niveau d'eau». Gouvernement du Québec.
- Church, M. 1983. «Patern of instability in a wandering gravel bed channel». *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, vol. 6, p. 169-180.
- Church, M. 1996. «Space, time and the mountain - How do we order what we see?». In *Scientific Nature of Geomorphology*, B. L. Rhoads et C. E. Thorn, p. 147-170. En ligne.
- Church, M. et Rice, S. P. 2009. «Form and growth of bars in a wandering gravel-bed river». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 34, no 10, p. 1422-1432.
- Desloges, J. R. et Church, M.A. 1989. «Wandering gravel-bed rivers ». *Canadian Geographer*, vol. 33, p. 360-364.
- Dionne, J.M. 2009. «Certificat d'autorisation environnementale, rivière de l'Anse-Pleureuse-excavation de sédiments et stabilisation riveraine». *Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs*, p. 4.
- Genivar. 2009. «Caractérisation de l'habitat du poisson dans sept secteurs riverains de la Gaspésie, Secteur de l'anse Pleureuse». *Ministère des Transports, no projet MTQ : 154071674*, 33p.
- Germanoski, D. 2001. «Bar forming processes in gravel-bed rivers, with implications for small-scale gravel mining.». In: *Applying Geomorphology to Environmental Management* (Eds D.J. Anthony, M.D. Harvey, J.B. Laronne and M.P. Mosley), pp. 3-323. *Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO*.
- Gilvear, D. J. 1999. «Fluvial geomorphology and river engineering: futur roles utilizing a fluvial hydrosystems framework». *Geomorphology*, vol. 31, p. 229-245.
- Gob, F., Houbrechts, G., Hiver, J. M. et Petit, F. 2005. «River dredging, channel dynamics and bedload transport in an incised meandering river (the River Semois, Belgium)». *River Research and Applications*, vol. 21, no 7, p. 791-804.
- Graf, W. L. 1979. «Mining and channel response». *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 69, no 2, p. 262-275.
- Héту, B. et Gray, J. 1985. «Le modelé glaciaire du centre de la Gaspésie septentrionale, Québec». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 39, no 1, p. 47-66.

- Hétu, B. et Gray, J. 2000. «Les étapes de la déglaciation dans le nord de la Gaspésie (Québec): Les marges glaciaires des Dryas ancien et récent». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 54, no 1, p. 5-40.
- Hooke, J.M. 1999. «Decades of change: contributions of geomorphology to fluvial and coastal engineering and management». *Geomorphology*, vol. 31, p. 373-389.
- James, A. 1999. «Time and the persistence of alluvium: River engineering, fluvial geomorphology, and mining sediment in California». *Geomorphology*, vol. 31, no 1-4, p. 265-290.
- Karle, P.E. et Kenneth, F. 2007. «Toklat River Gravel Excavation, Monitoring and Analysis». *Natural Resource Technical Report*, vol. U.S. Department of the Interior National Park Service Natural Resource Program Center Fort Collins, Colorado.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E et Bateman, D. S. 1999. «Digital terrain modeling of small stream channels with a total-station theodolite». *Advances in Water Resources*, vol. 23, no 1, p. 41-48.
- Kondolf, G. M. 1994. «Geomorphic and environmental effects of instream gravel mining». *Landscape and urban Planning*, vol. 28, p. 225-243.
- Kondolf, G. M. 1997. «Hungry water : effect of dams and gravel mining on river channels». *Environmental Management*, vol. 21, p. 533-551.
- Kondolf, G. M., David R. Montgomery, H. Piegay et L. Schmitt. 2003. «Geomorphic classification of rivers and streams». *Tools in fluvial geomorphology*.
- Kondolf, G. M., Piegay, H. et Landon, N. 2002. «Channel response to increased and decreased bedload supply from land use change: contrasts between two catchments». *Geomorphology*, vol. 45, no 1-2, p. 35-51.
- Kondolf, M., Smeltzer, M. W. et Railsback, S.F. 2001. «Design and Performance of a Channel Reconstruction Project in a Coastal California Gravel-Bed Stream». *Environmental Management*, vol. 28, no 6, p. 761-776.
- Lamarre, H. et Roy, A. G. 2008. «The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system». *Geomorphology*, vol. 99, no 1-4, p. 270-279.
- Langer, W.H. 2009. «A General Overview of the Technology of In-Stream Mining of Sand and Gravel Resources, Associated Potential Environmental Impacts, and Methods to Control Potential Impacts ». *U.S.G.S.*, 17p.

- Leopold, L.B., et Wolman, M.G. 1957. «River channel patterns-braided, meandering and straight». *U.S. Geological Survey, Professional Paper 282-B*, . p. pp. 39-86.
- Marston, R. A., Bravard, J. P. et Green, T. 2003. «Impacts of reforestation and gravel mining on the Malnant River, Haute-Savoie, French Alps». *Geomorphology*, vol. 55, no 1-4, p. 65-74.
- Milan, D. J., Heritage, G. L. et Hetherington, D. 2007. «Application of a 3D laser scanner in the assessment of erosion and deposition volumes and channel change in a proglacial river». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, no 11, p. 1657-1674.
- NOAA, Fisheries. 2004. «Sediment removal from freshwater salmonid habitat: Guidelines to NOAA Fisheries Staff for the Evaluation of Sediment Removal Actions from California Streams». 99p.
- Palmer, M. A., Hart, D.D., David Allan, J., Bernhardt, E. 2003. *Bridging engineering, ecological, and geomorphic science to enhance riverine restoration: local and national efforts.: Proceedings of A National Symposium on Urban and Rural Stream Protection and Restoration, EWRI World Water and Environmental Congress* (Philadelphia, Pa.). American Society of Civil Engineers, Reston Va.
- Petit, F., Gob, F., Houbrechts, G. et Assani, A. A. 2005. «Critical specific stream power in gravel-bed rivers». *Geomorphology*, vol. 69, no 1-4, p. 92-101.
- Poirier, C., et Niquet, M. 1992. «Étude hydraulique, reconstruction d'un pont au dessus de la rivière de l'Anse-Pleureuse». *Ministère des transport du Québec, Service de l'hydraulique*.
- Powell, D. M. 1998. «Patterns and processes of sediment sorting in gravel-bed rivers». *Progress in Physical Geography*, vol. 22, no 1, p. 1-32.
- Pyrce, R. S., et Ashmore, P. E. 2003. «The relation between particle path length distributions and channel morphology in gravel-bed streams: a synthesis». *Geomorphology*, vol. 56, no 1-2, p. 167-187.
- Québec. 1981. Loi sur la qualité de l'environnement, Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement. L.R.Q., c. Q-2, a. 31 section II b). Gouvernement du Québec, Gouvernement du Québec
- Québec. 2006. Loi sur les compétences municipales. L.R.Q., c. 47.1, a. 105 Gouvernement du Québec

- Reid, L.M., et Dunne, T. 2003. Sediment budgets as an organizing framework in fluvial geomorphology Tools in fluvial geomorphology . p. 464-500.
- Rempel, L. L. 2004. «Physical and ecological organization in a large, gravel-bed river and response to disturbance». *Thèse, University of British Columbia*.
- Rhéaume, S. 2009. «Demande d'autorisation environnementale pour la réalisation de travaux de dragage dans la rivière de l'Anse-Pleureuse». *Ministère des Transports du Québec*, p. 8p.
- Rhéaume, S. 2012. Processus de planification des travaux de dragage de 2009 à l'anse-Pleureuse
- Rice, S. P., et Church, M. 1998. «Grain size along two gravel-bed rivers: statistical variation, spatial pattern and sedimentary links». *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 23, p. 345-363.
- Rice, S. P., Church, M., Wooldridge, C. L. et Hickin, E. J. 2009. «Morphology and evolution of bars in a wandering gravel-bed river; lower Fraser river, British Columbia, Canada». *Sedimentology*, vol. 56, no 3, p. 709-736.
- Rovira, A., Batalla, R. J. et Sala, M. 2005. «Response of a river sediment budget after historical gravel mining (the Lower Tordera, NE Spain)». *River Research and Applications*, vol. 21, no 7, p. 829-847.
- Simard, P. 2012. «Effets des variables environnementales sur la propagation des ondes de crues dans la rivière à pierre en Gaspésie». *Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski*. 168p.
- Spink, A., Fryirs, K., Brierley, G. et Batalla, R. J. 229. «The relationship between geomorphic river adjustment and management actions over the last 50 years in the upper Hunter catchment, NSW, Australia». *River Research and Applications*, vol. 25, p. 904-928.
- Surian, N. et Rinaldi, M. 2003. «Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy». *Geomorphology*, vol. 50, no 4, p. 307-326.
- Tecsalt. 2009. «Caractérisation ichtyologique et de l'habitat du poisson de la rivière de l'Anse-Pleureuse, secteur du pont P-02275». *Rapport présenté ministère des transports du Québec, Réf: 6501-08-QH01*, 43 p.
- Vigneault, B., Hétu, B., Morissette, A. et Masse, M.A. 2011. «Inventaire du patrimoine géomorphologique de la MRC de la Haute-Gaspésie et identification des stratégies

de valorisation géotouristique». *Centre de recherche sur les milieux insulaires et maritimes*, 46 p. + annexes .

Wikipédia. 2012. «Tables des masses volumiques de diverses substances». Page web.

Wishart, D., Warburton, J. et Bracken, L. 2008. «Gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bed river: The River Wear, Northern England». *Geomorphology*, vol. 94, no 1-2, p. 131-152.

Ziliani, L. et Surian, N. 2012. «Evolutionary trajectory of channel morphology and controlling factors in a large gravel-bed river». *Geomorphology*, vol. 173, p. 104-117.